



---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

---

**PÂMELA CAROLINE BARROS FERNANDES**

**ESTIMATIVAS DE COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA  
PARA PROSPECÇÃO DE POTENCIAL HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR  
NO LITORAL NORDESTE DO BRASIL**

Porto Alegre

2021

**PÂMELA CAROLINE BARROS FERNANES**

**ESTIMATIVAS DE COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA PARA  
PROSPECÇÃO DE POTENCIAL HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR NO  
LITORAL NORDESTE DO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO  
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA  
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
ENGENHEIRA AMBIENTAL.

Orientador: Prof. Dr. Alfonso Risso

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Beluco

Porto Alegre

2021

### CIP - Catalogação na Publicação

Barros Fernandes, Pâmela Caroline  
ESTIMATIVAS DE COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA PARA  
PROSPECÇÃO DE POTENCIAL HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR NO  
LITORAL NORDESTE DO BRASIL / Pâmela Caroline Barros  
Fernandes. -- 2021.  
56 f.  
Orientador: Alfonso Risso.

Coorientador: Alexandre Beluco.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto  
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia  
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Geoprocessamento. 2. Energias Renováveis. 3.  
Complementaridade . I. Risso, Alfonso, orient. II.  
Beluco, Alexandre, coorient. III. Título.

PÂMELA CAROLINE BARROS FERNANDES

ESTIMATIVAS DE COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA PARA PROSPECÇÃO DE  
POTENCIAL HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR NO LITORAL NORDESTE DO BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **14/05/2021** pela Comissão avaliadora constituída por:

Banca Examinadora:

.....  
Prof. Dr. Elton Gimenez Rossini – Departamento de Energia - UERGS

.....  
Msc. Caarem Studzinski – Doutoranda em Sensoriamento Remoto - UFRGS

.....  
Eng. Mariana Tosi Corrêa – Mestranda em Sensoriamento Remoto - UFRGS

Conceito:.....**A**.....

*Dedico este trabalho a minha mãe que sempre incentivou  
minha educação, especialmente durante o período do meu  
Curso de Graduação.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais e avós por me incentivarem a acreditar que a realização deste sonho seria possível. Em especial a minha mãe, pelo esforço e dedicação ao longo de todos os anos da minha vida e pelo exemplo de mulher que és.

Agradeço ao meu companheiro William que desde o início do curso me acompanhou, ajudou e foi meu porto seguro nos momentos difíceis.

Á minha amiga de infância Édina que mesmo de longe sempre esteve me incentivando. Aos colegas de curso Bianca, Bruna, Gabriele, Julia, Leonardo, Maria, Matheus, Sabrina e Tuane pelo encorajamento e troca de saberes tanto na vida acadêmica quanto pessoal. Ao Engenheiro Pedro Ivo que foi meu primeiro supervisor de estágio e tornou-se um grande amigo.

Aos meus orientadores, Prof. Alfonso Risso e Prof. Alexandre Beluco pela confiança e assistência. Aos colegas do Laboratório de Geoprocessamento e Análise Ambiental (LAGAM) pela qualificação técnica em geoprocessamento que contribuiu para a realização deste trabalho, em especial ao Dr. Luis Chimelo Ruiz. Aos colegas da empresa Renobrax Energias Renováveis pelos ensinamentos e por acreditarem no meu potencial.

Agradeço a todos os amigos e familiares que estiveram ao meu lado e contribuíram para esta realização!

## RESUMO

**FERNANDES, P. C. B. Estimativas de complementaridade energética para prospecção de potencial híbrido eólico-solar.** 2021. 56 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O Brasil é um país privilegiado por sua grande disponibilidade de recursos energéticos renováveis. As fontes renováveis não convencionais, como a eólica e solar, ambas de natureza intermitente e inconstante, são um grande desafio para o planejamento do sistema elétrico de potência, e ambas vem desempenhando um eventual crescimento na geração de energia elétrica. A união dessas fontes através de sistemas híbridos de energia apresentam um melhor desempenho e um menor custo para a energia fornecida aos consumidores. O uso desses sistemas para geração de energia elétrica é relativamente recente, e como para qualquer tecnologia nova são necessários estudos e aprimoramentos. O objetivo deste trabalho é contribuir para a identificação de locais apropriados para instalação de sistemas híbridos eólico-solar no litoral nordeste do Brasil através de mapas baseados em estimativas de complementaridade das componentes tempo, energia e amplitude. Por meio do manejo de dados meteorológicos são feitas modelagens matemáticas para quantificar as complementaridades entre os dois recursos energéticos e assim mapeá-las usando ferramentas de geoprocessamento. A partir dos resultados obtidos identificou-se 7 regiões com potencial híbrido para pequeno porte (medições de vento a 10 metros de altura) e 3 regiões para grande porte (medições de vento a 100 metros de altura) englobados na parte onshore e offshore da área de estudo. Também, percebe-se que em alguns dos locais identificados ainda não há a exploração desses recursos renováveis e que esses se encontram próximos a malha elétrica existente. O estudo de complementaridades é uma importante ferramenta para o planejamento e gestão dos profissionais de energia, brevemente é possível avaliar se existe viabilidade entre duas ou mais fontes, ajudando na tomada de decisão e priorização de projetos, já que é disponibilizado uma comparação técnica quantitativa entre locais de interesse e/ou novas prospecções.

**Palavras-chave:** Energia renovável, Geoprocessamento, Complementaridade Energética, Energia Solar, Energia Eólica, Sistemas Híbridos de Energia.

## ABSTRACT

Brazil is a favoured country due to its great availability of renewable energy resources. Non-conventional renewable resources, such as wind and solar, both of which are intermittent and volatile in nature, are a major challenge for the planning of transmission systems, and both have been playing an eventual growth in the generation of electric energy. The combination of these resources through hybrid energy systems presents a better performance and a lower cost for the energy supplied to consumers. The use of these systems for electricity generation is relatively recent and as with any new technology, studies and improvements are needed. The purpose of this work is to contribute to the identification of appropriate locations for the installation of wind-solar hybrid systems on the Northeast coast of Brazil, through maps based on the complementarity of the components time, energy and amplitude. Through the management of meteorological data, mathematical modeling is done to quantify the complementarities between the two energy resources and thus map these using geoprocessing tools. From the results obtained, 7 places with hybrid potential were identified for small size installations (wind measurements at 10 meters high) and 3 places for large size (wind measurements at 100 meters high) included in the onshore and offshore part of the area of study. Also, it is noticed that in some of the identified places there is still no exploitation of these renewable resources and such locations are close to the existing electrical grid. The study of complementarities is an important tool for the planning and management of energy professionals, it is soon possible to assess whether there is viability between two or more sources, helping in decision making and project prioritization, as quantitative technical comparison between places of interest and/or new prospects are made available.

**Keywords:** Renewable Energy, Geoprocessing, Energy Complementarity, Solar Energy, Wind Energy, Hybrid Energy Systems.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh).-----	20
Figura 2. Turbina eólica e suas componentes.-----	22
Figura 3. Distribuição dos projetos eólicos offshore em função do tamanho, da profundidade de instalação e da costa.-----	24
Figura 4. Exemplos de estruturas com fundação fixa.-----	25
Figura 5. Exemplos de estruturas com fundação flutuante.-----	25
Figura 6. Célula Solar.-----	27
Figura 7. A) Tracker de um eixo Horizontal Norte-Sul. B) Tracker de um eixo Vertical Leste-Oeste. C) Tracker de dois eixos Norte-Sul e Leste-Oeste.-----	27
Figura 8. Esquema geral solar fotovoltaico flutuante.-----	28
Figura 9. Sistema Híbrido eólico-solar conectado à rede.-----	29
Figura 10. Previsão de crescimento de carga do SIN.-----	31
Figura 11. Funções matemáticas que caracterizam as disponibilidades de energia perfeitamente complementares ao longo de um ano.-----	33
Figura 12. Mapa de localização da área de estudo.-----	35
Figura 13. Representação gráfica das distribuições de velocidades do vento e da função Weibull.-----	39
Figura 14. Valores típicos de albedo integrados sobre a faixa de onda visível para normalmente.-----	41
Figura 15. Curvas logarítmicas das velocidades máximas e mínimas do vento para diferentes alturas.-----	44
Figura 16. A) Complementaridade Temporal Mínima. B) Complementaridade Temporal Máxima.-----	45
Figura 17. A) Complementaridade Energética com vento a 10 m de altura. B) Complementaridade Energética com vento a 100 m de altura.-----	47
Figura 18. A) Complementaridade de Amplitude com vento a 10 m de altura. B) Complementaridade de Amplitude com vento a 100 m de altura.-----	48
Figura 19. Complementaridade Total com vento a 10 m de altura.-----	49
Figura 20. Complementaridade Total com vento a 100 m de altura.-----	50
Figura 21. Complementaridade Total e Sistema interligado Nacional.-----	51

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Potencial Energético Renovável Brasileiro (Mtep). ----- 21

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
CSV	<i>Comma-Separated-Values</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IPHAN	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
MTEP	Tonelada equivalente de petróleo
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR/PEL	Plano de Ampliações e Reforços/ Plano da Operação Elétrica
PNE	Plano Nacional de Energia
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
TPS	<i>Thin plate spline</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$K_t$	Índice de Complementaridade Parcial No Tempo
$d_w$	Mês de Menor Disponibilidade Eólica
$d_s$	Mês de Menor Disponibilidade Solar
$D_w$	Mês de Maior Disponibilidade Eólica
$D_s$	Mês de Maior Disponibilidade Solar.
$K_e$	Índice de Complementaridade Energética Parcial
$E_w$ (W/m <sup>2</sup> )	Disponibilidade Média Anual de Energia Eólica
$E_s$ (W/m <sup>2</sup> )	Disponibilidade Média Anual de Energia Solar
$Z_0$ (m)	Comprimento de Rugosidade no Local
$P_w/A$ (W/m <sup>2</sup> )	Potência Média por áreas de disco varridas pelas pás da Turbina Eólica
$V$ (m/s)	Velocidade Média do Vento na Altura H.
$V_1$ (m/s)	Velocidade do Vento no Ponto 1
$V_2$ (m/s)	Velocidade do Vento no Ponto 2
$h_1$ (m)	Altura do Vento no Ponto 1
$h_2$ (m)	Altura do Vento no Ponto 2
$C_p$	Coefficiente de Energia para uma Turbina Eólica
$\eta_c$	Eficiência de Conversão Mecânica
$\rho_{ar}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade do Ar em Condições Atmosféricas Padrão
$f(v)$	Função Densidade de Probabilidade De Weibull
$k$	Parâmetro de Forma de Weibull
$k_1$	Parâmetro de Forma de Weibull na Altura $H_1$
$k_2$	Parâmetro de Forma de Weibull na Altura $H_2$
$C$ (m/s)	Fator de Escala
$n$	Expoente do Fator de Escala
$C_1$ (m/s)	Fator de Escala com a Altura $H_1$
$C_2$ (m/s)	Fator de Escala com A Altura $H_2$
$\sigma$ (m/s)	Desvio Padrão da Velocidade do Vento
$R_t$ (W/m <sup>2</sup> )	Radiação Total sobre a Superfície Inclinada
$R_d$ (W/m <sup>2</sup> )	Radiação Direta sobre a Superfície Inclinada
$R_s$ (W/m <sup>2</sup> )	Radiação Refletida pela Superfície Horizontal sobre a Superfície Inclina
$R_g$ (W/m <sup>2</sup> )	Radiação Solar Global sobre a Superfície Horizontal
$\rho$	Albedo da Superfície Horizontal

$\beta$	Inclinação da Superfície
Ka	Índice de Complementaridade de Amplitude Parcial
$\delta$	Varição de Amplitude Energética
$\delta_w$	Varição de Energia Eólica
$\delta_s$	Varição de Energia Solar
$E_{\text{máx}}$ (W/m <sup>2</sup> )	Máximo Valor de Energia Disponível da Fonte
$E_{\text{mín}}$ (W/m <sup>2</sup> )	Mínimo Valor de Energia Disponível da Fonte
$E_c$ (W/m <sup>2</sup> )	Consumo Médio de Energia
KT	Índice de Complementaridade Total

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 ORGANIZAÇÃO.....	17
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
3.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL .....	19
3.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS .....	20
3.2.1 Energia Eólica.....	21
3.2.1.1 Onshore .....	23
3.2.1.2 Offshore .....	23
3.2.2 Energia Solar Fotovoltaica.....	26
3.2.2.1 Onshore.....	27
3.2.2.2 Offshore .....	28
3.2.3 Sistemas híbridos .....	28
3.1.3.1 Impactos ambientais.....	30
3.3 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL.....	30
3.4 COMPLEMENTARIDADE .....	32
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>34</b>
4.1 DADOS METEROLÓGICOS .....	34
4.1.1 Área de estudo.....	35
4.2 COMPLEMENTARIDADE TEMPORAL.....	36
4.3 COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA .....	36
4.3.1 Disponibilidade de Energia Eólica.....	37
4.3.1.1 Parâmetros de Weibull .....	38
4.3.2 Disponibilidade de Energia Solar.....	40
4.4 COMPLEMENTARIDADE DE AMPLITUDE.....	41
4.5 COMPLEMENTARIDADE TOTAL .....	42

4.6 SISTEMA ENERGÉTICO.....	43
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>44</b>
5.1 COMPLEMENTARIDADE TEMPORAL.....	44
5.2 COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA .....	46
5.3 COMPLEMENTARIDADE DE AMPLITUDE .....	47
5.4 COMPLEMENTARIDADE TOTAL .....	49
5.5 SISTEMA ENERGÉTICO.....	50
<b>6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país privilegiado por sua grande disponibilidade de recursos energéticos renováveis, cuja matriz energética apresenta uma crescente diversidade de suprimentos de energia, obtidos a partir de diferentes recursos. Entretanto, o cenário de crises políticas e econômicas faz com que a oferta de novos suprimentos de energia não aconteça com a celeridade necessária. Os objetivos de desenvolvimento sustentável traçados pela Assembleia Geral das Nações Unidas visando a eficiência energética global abrangem três ações principais: garantir preços acessíveis, confiáveis e acesso universal a serviços modernos de energia; aumentar substancialmente a participação da energia renovável na matriz energética global; e dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética. Para que ocorra essa transição energética se faz necessário uma economia favorável, recursos onipresentes, tecnologia escalonável e benefícios socioeconômicos significativos (GIELEN *et al.*, 2019).

A energia solar e a energia eólica são fontes de energia renováveis, limpas e sustentáveis. A energia solar provém da radiação solar e pode ser utilizada como fonte de energia térmica, para aquecimento e geração de potência elétrica ou mecânica, enquanto que a energia eólica transforma energia cinética em energia elétrica através da intensidade do vento (originados pelo aquecimento da superfície terrestre). O uso dessas fontes de energia para geração de energia elétrica é relativamente recente, suas instalações podem ser onshore (em terra) ou offshore (no mar, embora também possa ser definido como qualquer instalação sob superfície aquática) e, como para qualquer tecnologia nova, são necessários estudos e aprimoramentos.

A geração descentralizada de energia aproveita recursos locais e possibilita soluções ambientais mais adequadas muitas vezes, de menor custo global (CUSTÓDIO, 2013). A instalação dos sistemas energéticos próximos a pequenos centros de carga diminui as perdas elétricas na transmissão e aumenta a confiabilidade da região. Fato importante é que a produção de energias renováveis isoladas, como eólica e solar, geralmente depende de padrões diurnos e sazonais dos recursos naturais usados para gerar eletricidade. No entanto, se duas ou mais fontes existem na mesma região em quantidades significativas, isso pode justificar seu uso complementar em um sistema híbrido.



Existem poucas metodologias que permitem estudar e analisar a exploração e inserção da energia eólica associada com a energia solar de forma complementar a geração de energia para o sistema elétrico. Por isso, o estudo da complementaridade nas componentes tempo (série histórica), energética (geração de energia) e de amplitude (variação energética) se faz essencial para o desenvolvimento da matriz energética de forma renovável. O conceito de complementaridade contribui para um melhor planejamento da expansão do sistema elétrico e do aproveitamento dos recursos disponíveis. Além disso, colabora com a consolidação de uma nova ferramenta para gestores de recursos renováveis e com critérios de escolha para priorização de projetos de geração de energia. A compreensão da complementaridade de sistemas híbridos de recursos energéticos renováveis, através de ferramentas que permitam a sua quantificação e mapeamento, otimizam custos de implantação e operação ao identificar os locais apropriados com o melhor desempenho energético e, conseqüentemente, sejam capazes de atenuar os impactos ambientais causados por tais empreendimentos.

## 1.1 ORGANIZAÇÃO

Nos capítulos iniciais deste trabalho, é feita uma descrição sucinta e objetiva dos conceitos fundamentais de energia renovável e complementaridade energética, revisando algumas pesquisas prévias.

Nos capítulos complementares, são descritos os materiais e métodos utilizados que resultaram na confecção de mapas para identificação de locais apropriados para instalação de sistemas híbridos eólico-solar no litoral nordeste do Brasil, a partir do conceito de complementaridade energética nas componentes tempo, amplitude e energia.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho é identificar os locais apropriados para a implantação de sistemas híbridos de geração de energia renovável, para as fontes eólica e solar, baseado na complementaridade das componentes tempo, energia e amplitude.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Compreender a influência da complementaridade energética com suas três componentes atreladas;
- II. Identificar áreas para possíveis interconexões dos sistemas elétricos, por meio da malha de transmissão do Sistema Interligado Nacional.
- III. Melhorar o entendimento da complementaridade como ferramenta de planejamento e gestão;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O princípio do desenvolvimento sustentável é proveniente de dois princípios jurídicos: o direito ao desenvolvimento e o da preservação do meio ambiente (VARELLA, 2004). No Brasil, a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei nº 6.938/81) foi responsável por introduzir a noção de desenvolvimento sustentável. A partir da Política Nacional de Mudança do Clima (Lei nº 12.187/09) estabeleceu-se que o princípio do desenvolvimento sustentável deve ser observado pelos gestores públicos, que têm o dever de atuar em benefício para as atuais e futuras gerações. Fica postulada a necessidade de redução dos impactos causados pelo homem sobre o sistema climático, bem como a noção de que o desenvolvimento sustentável é condição indispensável ao enfrentamento das alterações climáticas (BRASIL, 1981; BRASIL, 2009; KRELL & SOUZA, 2020).

Atualmente, a energia é um bem essencial e indispensável que abrange a dinâmica econômica e ambiental. A economia mundial baseia-se na geração de energia, que é dependente dos recursos naturais. Assim, a relação entre energia e desenvolvimento é intrínseca, a ponto de o indicador de consumo de energia per capita medir o nível de desenvolvimento dos países (GOLDEMBERG, 1998).

O marco regulatório das energias limpas no Brasil foi aprovado perante o PL nº 414/2021, o qual ainda está em tramitação para publicação e altera as Leis nº 9.074, de 7 de julho de 1995, nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, nº 10.438, de 26 de abril de 2002, nº 10.848, de 15 de março de 2004, nº 12.783, de 11 de janeiro de 2013, nº 13.203, de 8 de dezembro de 2015, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, e nº 12.111, de 9 de dezembro de 2009, para aprimorar o modelo regulatório e comercial do setor elétrico com vistas à expansão do mercado livre e outras providências. O Art. 2, parágrafo §1º- D, dispõem o seguinte:

“§ 1º-D. O Poder Executivo deverá implementar plano para a valorização dos benefícios ambientais relacionados às fontes de energia com baixa emissão de gases causadores do efeito estufa em até 12 (doze) meses após a entrada em vigor deste parágrafo.”

Tal publicação garante a segurança energética a partir de fontes renováveis nacionais, através da diminuição da dependência de combustíveis fósseis - cujos preços são regulados pelo mercado internacional - e da valorização dos benefícios ambientais. Logo, o interesse e o investimento em fontes renováveis tendem a aumentar e, conseqüentemente, a demanda por técnicas que aprimorem a prospecção de potencial, geração e distribuição de energia.

### 3.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS

As energias renováveis provêm de recursos naturais que são ou podem ser naturalmente reabastecidos, como a radiação solar, a precipitação, as marés, o vento e a geotermia. A energia denominada sustentável é a que mantém um ciclo equilibrado de produção e consumo, no qual a natureza pode repô-lo. A ampliação do seu uso contribui para a redução da emissão de gases do efeito estufa, especialmente nos países onde a matriz energética apresenta predominância de fontes fósseis, colaborando assim com as metas ambientais de combate ao efeito estufa (BARBOSA, 2015; WANG *et al.*, 2019)

As políticas de energia do Brasil respondem bem aos desafios de energia mais urgentes do mundo. As energias renováveis correspondem a 94% das fontes utilizadas para geração de energia elétrica (Figura 1), tornando o setor de energia do Brasil um dos menos intensivos em carbono do mundo (EPE, 2020a).

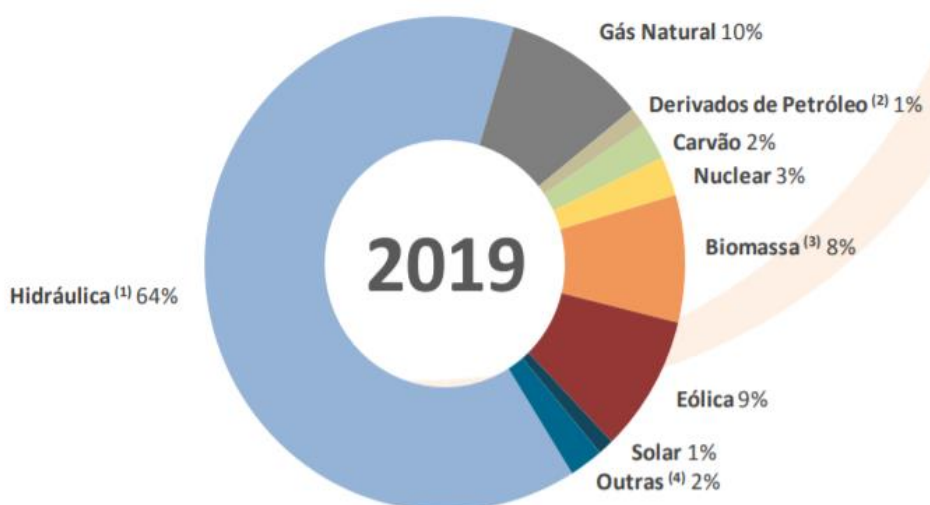


Figura 1. Geração elétrica por fonte no Brasil (GWh).

(Fonte: EPE, 2020a).

O Plano Nacional de Energia 2050 – PNE 2050 (EPE, 2020b), conjunto de estudos e diretrizes para o desenho de uma estratégia de longo prazo para o setor energético brasileiro, anuncia uma demanda de 600 Mtep para o ano de 2050 e ressalta que uma parcela significativa das fontes de energia para suprir essa demanda é composta por recursos renováveis. Na Tabela 1 observa-se que há disponibilidade de 7.371 Mtep para atender ao crescimento esperado, superando a demanda de energia no horizonte de 2050, desde que o potencial seja bem aproveitado.

Tabela 1. Potencial Energético Renovável Brasileiro (Mtep).  
Fonte: Adaptado de EPE,2020b.

<b>Fonte</b>	<b>2015-2020</b>
Biomassa	531
Hidráulica	74
Eólica Onshore	30
Eólica Offshore	1.356
Fv Onshore	43
Fv Offshore	5.247
Heliotérmica	57
Oceânica	34
<b>Total</b>	<b>7.371</b>

O processo para transição energética deve ser embasado por condicionantes como desenvolvimento sustentável, mudanças climáticas e inovações. Assim, precisam ser realizadas avaliações quanto ao aproveitamento dos recursos, de modo a garantir o atendimento da projeção energética futura, cujos resultados permitirão a elaboração dos planos de ação.

### 3.2.1 Energia Eólica

O vento é uma fonte de energia gratuita, limpa e inesgotável. Representa cerca de 2% da energia solar incidente na superfície da terra que se converte em energia cinética

oriunda da atmosfera e cerca de 30% da energia cinética presente nas altitudes abaixo de 1000 m (JENKINS & EKANAYAKE, 2017; JOHNSON, 2006).

A energia eólica está começando a ter um impacto significativo no funcionamento do moderno sistema de rede de transmissão de energia. Parques eólicos onshore e offshore estão em constante crescimento, produzindo centenas de megawatts (BLAAB & MA, 2017).

A fonte eólica utiliza turbinas eólicas (Figura 2) para gerar energia por meio da transformação da força do vento, na forma de energia cinética, em energia mecânica, através da força giratória nas pás do rotor que aciona um gerador elétrico (alternador). As turbinas eólicas com potência nominal inferior a 500 kW são consideradas de pequeno porte, as turbinas entre 500 kW e 1000 kW de médio porte e as turbinas com potência nominal superior a 1MW de grande porte (JENKINS & EKANAYAKE, 2017; CUSTÓDIO, 2013; CRESESB, 2019).

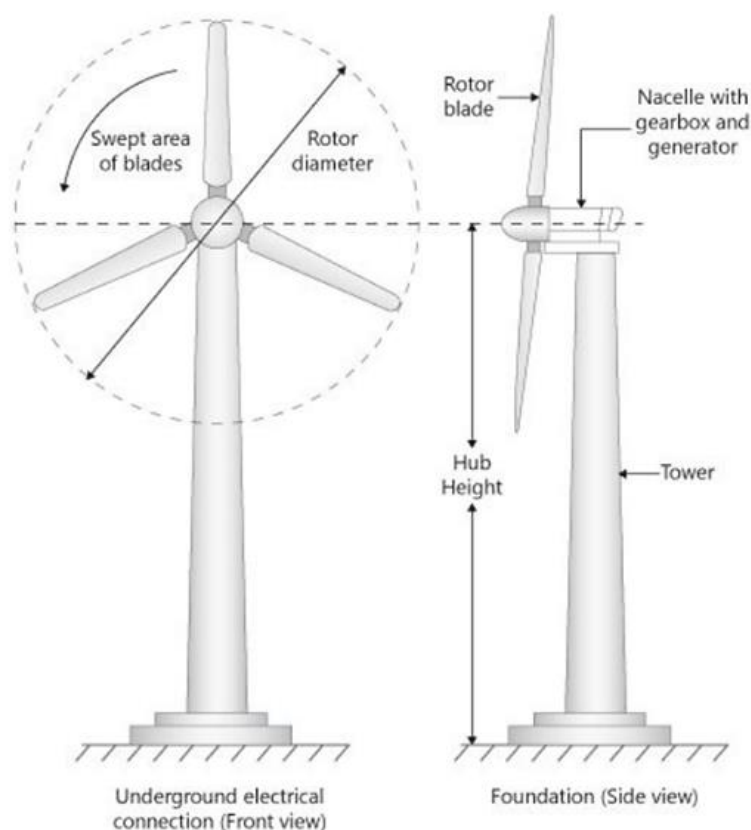


Figura 2. Turbina eólica e suas componentes.  
(Fonte: Jenkins & Ekanayake, 2017).

### 3.2.1.1 Onshore

Existem vários tipos de turbinas, mas recentemente o projeto mais comum é o eixo horizontal com três pás cujo rotor é colocado a favor ou contra o vento. As turbinas eólicas modernas têm duas variantes de tamanho, podem ser pequenas unidades com capacidade de produção de apenas 100 W até 60 a 80 kW, geralmente usadas para sistemas de energia rurais e autônomos, ou grandes unidades com capacidade de 150 kW até 5 MW, usadas para grande escala. As fundações são uma estrutura de concreto armado responsável pela sustentação do aerogerador (CUSTÓDIO, 2013).

Antes de iniciar a construção das fundações são realizadas no terreno sondagens para o dimensionamento estrutural do projeto executivo. A base é uma estrutura bastante complexa que tem a função de suportar toda a carga estática e cinética contida em um aerogerador. Se fazem necessárias as etapas de montagem da forma de concreto, armação em aço da base, instalação do sistema de eletrodutos (responsáveis por ligar os equipamentos e transmitir a energia gerada para subestação), instalação do sistema de aterramento, ancoragens para fixação da estrutura pós-tendida e gabarito com peças de fixação da torre (ATLANTIC, 2019).

No aspecto social, as usinas eólicas onshore não provocam desapropriações e remanejamento de pessoas, mas sim fomentação nas suas fontes de renda por meio de contratos de locação com investidores em energia eólica. Existe ainda a possibilidade de compatibilizar a produção de energia e o uso da terra para pecuária e agricultura. A obtenção dessa renda extra permite o investimento em melhorias na produção e infraestrutura da propriedade (SIMAS & PACCA, 2013).

### 3.2.1.2 Offshore

A fonte eólica offshore vem crescendo no mundo, o que motivou o Brasil a buscar entender melhor o potencial e outras características referentes a essa fonte. Embora os projetos eólicos offshore utilizem uma tecnologia semelhante aos projetos eólicos onshore, as instalações offshore possuem algumas vantagens como maiores e mais constantes velocidades de vento e menos restrições de disponibilidade de áreas. Os indicadores de desempenho desses parques geralmente são melhores devido à baixa rugosidade da superfície que garante bons ventos a baixas alturas, a ausência de

obstáculos que causa pouca turbulência e o isolamento que garante que os ruídos não sejam um problema (IEA, 2018; SILVA, 2020).

A Figura 3 mostra as tendências de projetos eólicos offshore no mundo indicando que há um avanço da instalação dos parques em áreas mais afastadas da costa e com maiores profundidades. As cores dos círculos na figura sugerem a fase no qual os projetos se encontram - instalado, em construção, contratado, aprovado, com permissão - e o tamanho a potência estimada para cada projeto (NREL, 2020).

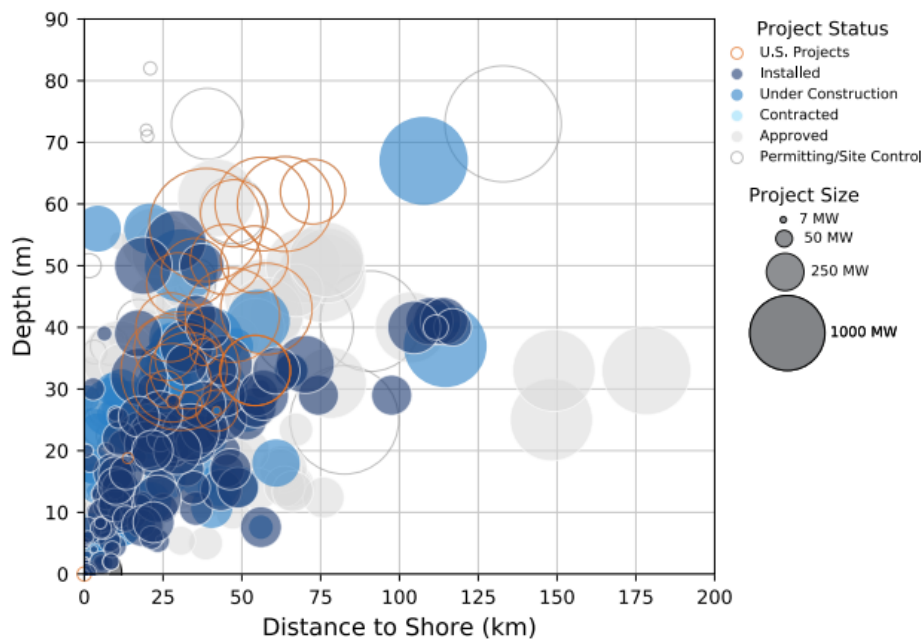


Figura 3. Distribuição dos projetos eólicos offshore em função do tamanho, da profundidade de instalação e da costa.  
(Fonte: NREL, 2020).

A estrutura usualmente encontrada para turbinas offshore possui duas partes distintas: uma situada sobre o nível do mar e semelhante às acima do nível do terreno nas estruturas onshore e outra sob o nível do mar. A fundação offshore é definida como toda a estrutura de suporte para a instalação da turbina eólica no mar, ou seja, toda a estrutura abaixo da linha do mar, podendo ser fixa (Figura 4) ou flutuante (Figura 5) (EPE, 2020d; IRENA, 2018).



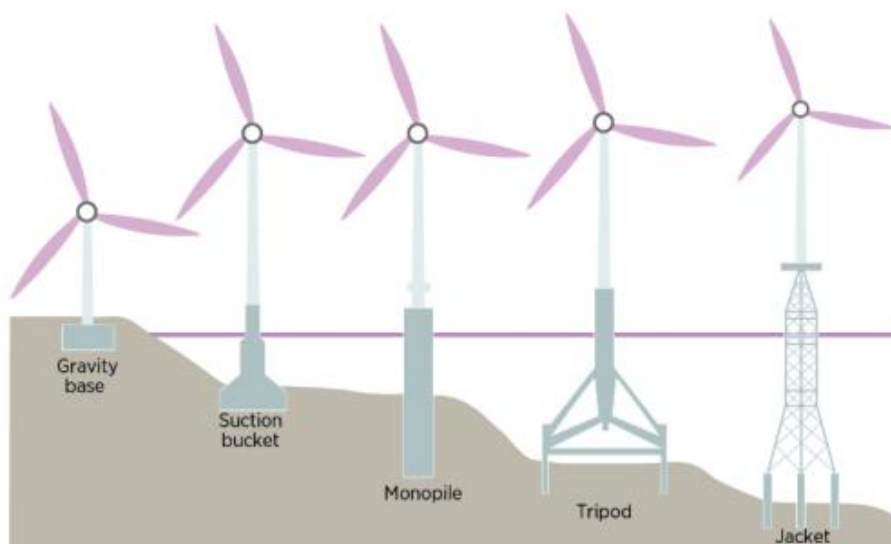


Figura 4. Exemplos de estruturas com fundação fixa.  
(Fonte: IRENA, 2018).

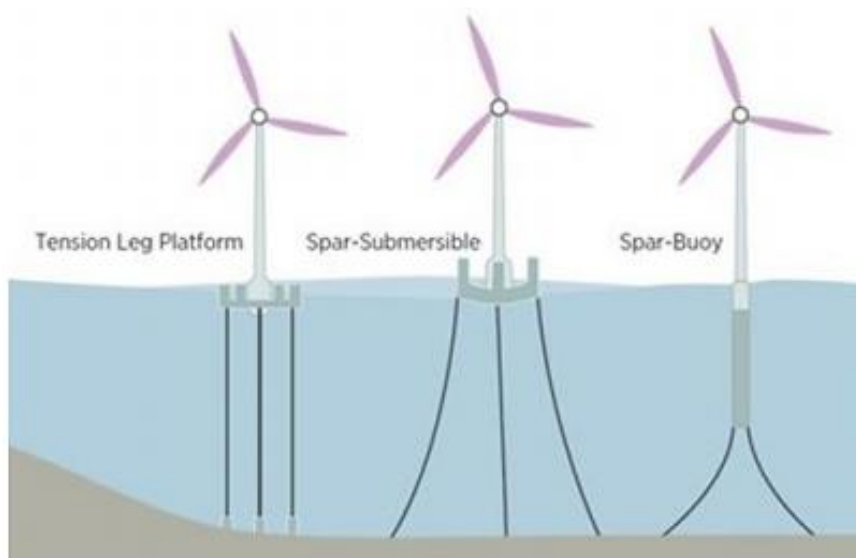


Figura 5. Exemplos de estruturas com fundação flutuante.  
(Fonte: IRENA, 2018).

Nos projetos eólicos além de avaliar o setor de geração e transmissão de energia, também é necessário considerar o transporte marítimo, infraestrutura portuária, outras indústrias marítimas e todos os aspectos do ambiente marinho.

### 3.2.2 Energia Solar Fotovoltaica

O sol está continuamente liberando hidrogênio por meio de reações de fusão e consequentemente uma grande quantidade de energia térmica. A energia solar é o principal recurso de todos os tipos de energia produzidos na terra, é a energia radiante, e produzida pela luz solar que pode ser renovada direta ou indiretamente em outra forma de energia como calor e eletricidade. Comparada às fontes convencionais de geração de energia, como as que utilizam combustíveis fósseis, a tecnologia fotovoltaica não traz os graves problemas ambientais, como mudanças climáticas, aquecimento global, poluição do ar, chuva ácida e assim por diante. Outra vantagem é que a energia solar não precisa ser extraída, refinada ou transportada até o local de geração, que fica próximo à carga.

A irradiância solar ( $W/m^2$ ) que incide em uma superfície é composta por suas componentes direta e difusa. A irradiância direta apresenta direção de incidência na linha imaginária entre a superfície e o Sol e representa a parcela que não sofreu os processos radiativos de absorção e espalhamento que ocorrem na atmosfera. A componente difusa engloba a radiação proveniente de todas as demais direções que são decorrentes dos processos de espalhamento pelos gases e particulados presentes na atmosfera (PEREIRA *et al.*, 2017).

A captação de energia solar através de painéis fotovoltaicos para a produção de eletricidade é considerada um dos mercados mais promissores na área das energias renováveis. A tecnologia fotovoltaica usa material semicondutor para converter a luz solar diretamente em eletricidade. Equipamentos fotovoltaicos são capazes de gerar eletricidade mesmo durante o inverno e o tempo nublado, as quais reduzem a taxa de produção. A célula solar é o dispositivo que converte a energia solar em energia elétrica, e seu funcionamento é baseado no princípio do efeito fotovoltaico. Uma célula solar consiste em dois tipos de semicondutores colocados em contração um com o outro. Um é do tipo-p feito de silício dopado com boro e outro do tipo-n de silício dopado com fósforo (Figura 6). Uma diferença de potencial é desenvolvida entre as duas camadas através da luz do sol. Essa diferença de potencial resulta em fluxo de elétrons e, portanto, a corrente elétrica é produzida (JENKINS & EKANAYAKE, 2017; GONÇALVES & GONZÁLEZ, 2019).

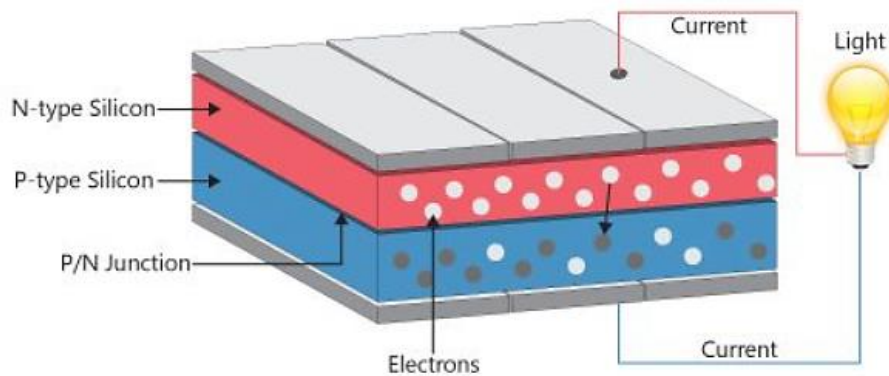


Figura 6. Célula Solar.  
(Fonte: Jenkins & Ekanayake, 2017).

### 3.2.2.1 Onshore

Um sistema fotovoltaico convencional para usinas em solo é composto principalmente por módulos fotovoltaicos, inversores e estruturas de suporte dos módulos, que podem ser fixas ou com rastreamento de 1 ou 2 eixos. Os modelos de rastreamento são os mais usuais, com inclinação e orientação projetadas para um melhor aproveitamento relacionado à região de instalação da usina. Os modelos de rastreamento tipo *tracker* de um eixo podem girar no sentido horizontal Norte-Sul ou vertical Leste-Oeste, enquanto os modelos de dois eixos conseguem girar no sentido Norte-Sul e Leste-Oeste (Figura 7) (MARTINS, 2016; FIGUEIREDO & MARTINS, 2017; EPE, 2020c).

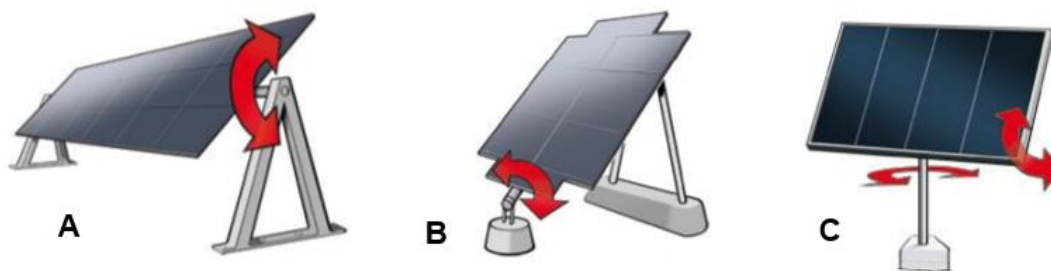


Figura 7. A) Tracker de um eixo Horizontal Norte-Sul. B) Tracker de um eixo Vertical Leste-Oeste. C) Tracker de dois eixos Norte-Sul e Leste-Oeste.

(Fonte: Adaptado de MARTINS, 2016)

### 3.2.2.2 Offshore

A principal diferença entre uma usina fotovoltaica onshore e offshore é o tipo de fundação, sendo que para o meio offshore é utilizado um sistema flutuante para suporte dos módulos fotovoltaicos. Basicamente, as usinas fotovoltaicas flutuantes (FVF) são constituídas por módulos fotovoltaicos, plataformas flutuantes (estruturas de suporte para instalação dos módulos fotovoltaicos que proporcionam estabilidade e flutuabilidade a estes e contem passarelas para manutenção, suporte para os cabos elétricos e inversores, em alguns casos), ancoragem e amarração (para fixação da plataforma flutuante nas margens e/ou no fundo do corpo d'água) e cabos elétricos (Figura 8). A subestação e linha de distribuição são as únicas estruturas desse sistema que ficam instaladas sob a terra. (EPE, 2020c).

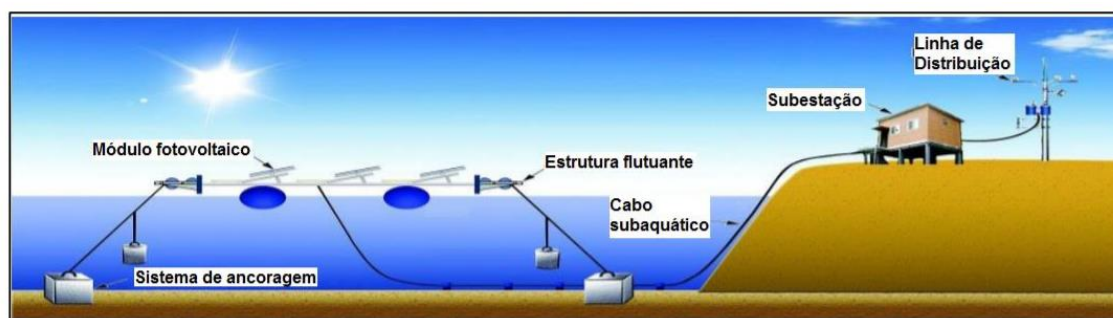


Figura 8. Esquema geral solar fotovoltaico flutuante.  
(Fonte: EPE, 2020c)

As principais vantagens com a implantação de FVF são ganhos de eficiência, redução de perda por sombreamento e sujeira e redução da evaporação dos reservatórios. Entretanto, algumas desvantagens são observadas, como o acúmulo de dejetos de pássaros e impacto na vida aquática local.

### 3.2.3 Sistemas híbridos

Sistemas híbridos de energia têm custos iniciais mais altos do que os sistemas baseados em apenas um recurso renovável, no entanto, apresentam melhor desempenho e menor custo para a energia fornecida aos consumidores. A complementaridade entre as fontes, muitas vezes verificada em alguns locais durante diferentes períodos, garante maior confiabilidade ao sistema, além de reduzir consideravelmente a participação do

banco de baterias e/ou do grupo gerador à diesel. Dentre as vantagens desses sistemas estão: utilização dos recursos que estão disponíveis no local; flexibilidade dos sistemas facilmente ampliáveis, devido à modularidade dos subsistemas de geração; proximidade da carga a ser atendida; forma de geração descentralizada; completamente adaptável às necessidades energéticas dos usuários (PINHO *et al.*, 2008).

Os sistemas híbridos de geração de energia eólica-solar consistem principalmente em um painel fotovoltaico, uma turbina eólica, um inversor, um controlador e outros dispositivos. O painel fotovoltaico e a turbina eólica trabalham juntos para gerar energia para os usuários. O inversor e o controlador são usados para ajustar a saída de acordo com a demanda de carga dos usuários finais. Geralmente, os sistemas híbridos de geração de energia eólica fotovoltaica podem ser desconectados ou conectados à rede, dependendo da carga local e da distribuição da rede. Em comparação com os sistemas fora da rede, os sistemas conectados à rede (Figura 9) são mais econômicos porque não requerem a instalação de um banco de baterias, o que constitui uma grande parte do custo líquido total no momento. Além disso, podem fornecer energia excedente à rede de maneira flexível durante os períodos de baixa demanda local (GUO *et al.*, 2018).

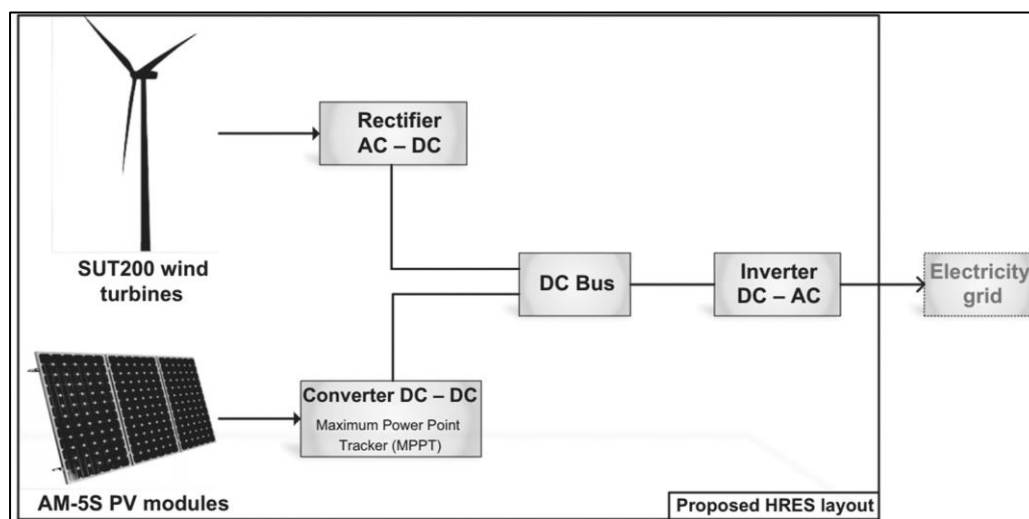


Figura 9. Sistema Híbrido eólico-solar conectado à rede.  
(Fonte: GUO *et al.*, 2018).

Para reduzir o custo dos sistemas híbridos e garantir que sejam econômicos e ecologicamente corretos, a otimização de seu tamanho é importante. A qualidade da energia e a estabilidade do sistema podem ser alcançadas por uma técnica de controle

apropriada incorporada ao circuito de controle do conversor de energia (ARUL *et al.*, 2015).

#### 3.1.3.1 Impactos ambientais

Considerando a inserção dos sistemas no meio ambiente, o principal impacto negativo constitui-se no descarte dos materiais, como os painéis solares e as baterias que compõem o subsistema de armazenamento. Até o momento, no Brasil, os painéis fotovoltaicos não estão enquadrados na Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Acordos setoriais estão sendo realizados para que seja feito o descarte correto dos painéis fotovoltaicos paralelamente à expansão do mercado de energia solar. Especialistas estudam a criação de uma nova lei, implementada e fiscalizada pelo IBAMA, que classifique os resíduos fotovoltaicos como especiais. É fundamental o enquadramento desses resíduos para mitigar tais impactos.

Outros impactos, como o visual e o sonoro (ambos provenientes sobretudo dos aerogeradores), e do espaço utilizado para instalação dos subsistemas de geração renovável (solar fotovoltaico e eólico, por exemplo), são diminutos. Entretanto, deve-se atentar para a instalação dos aerogeradores fora de eventuais rotas de pássaros, especialmente os migratórios, e suficientemente afastados das residências, para evitar ruídos indesejáveis (PINHO *et al.*, 2008).

Além dos estudos ambientais desenvolvidos para avaliação dos órgãos ambientais responsáveis, de acordo com o porte do empreendimento, é necessário apresentar os estudos arqueológicos para avaliação perante o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN.

### 3.3 SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é

um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários, e é constituído por quatro subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. Na Figura 10 é possível observar um crescimento de carga do SIN de 20% para o ano de 2025 conforme Plano da Operação elétrica de médio prazo do SIN, PAR/PEL Executivo 2021-2025 (ONS, 2020).



Figura 10. Previsão de crescimento de carga do SIN.  
(Fonte: ONS, 2020).

As fontes renováveis não convencionais (eólica e solar), ambas de natureza intermitente e volátil, são um grande desafio para o planejamento dos sistemas de transmissão e vem desempenhando um eventual crescimento na geração de energia elétrica. Para garantir uma operação segura do SIN, será necessário prover recursos que permitam assegurar qualidade e confiabilidade desejadas para o atendimento do consumidor de energia elétrica, frente às intensas variações de carga proveniente da variabilidade do vento ou da transição do horário diurno e noturno. Assim, são necessárias interligações bem estruturadas, com capacidade de absorver as variações de potência e garantir ao sistema uma reserva de potência adequada, especialmente nas regiões do país onde se verifica uma elevada concentração dessas novas fontes. Também é fundamental a coordenação da entrada em operação dessas novas fontes com o sistema de escoamento e conexão das mesmas à rede básica (TOMALSQUIM, 2017; ONS, 2018). Uma previsão mais exata das fontes energéticas renováveis reduz o risco de incerteza e, conseqüentemente, permite um planejamento mais eficiente da integração ao sistema elétrico. Assim, é possível realizar um balanceamento mais econômico em tempo real além de exigir menos da capacidade de reserva operacional, proporcionando uma redução de custos (FOLEY *et al.*, 2012).

### 3.4 COMPLEMENTARIDADE

As energias solar e eólica são consideradas como fontes intermitentes de energia, pois dependem da taxa de irradiação solar e da velocidade do ventos. A quantidade de produção de energia produzida pode variar muito no intervalo de tempo. A análise da complementaridade entre recursos renováveis não se limita somente ao estudo do comportamento das condições atmosféricas locais e seu impacto no potencial energético, mas também está relacionado com as tecnologias aplicadas para conversão deste potencial em energia elétrica (ORTIZ, 2014). Em um sistema híbrido de fontes renováveis intermitentes e voláteis, a abordagem da complementaridade poderá aumentar a eficiência do sistema.

A complementaridade é definida como a capacidade de duas (ou mais) fontes de energia apresentarem uma complementaridade de disponibilidade entre eles. A complementaridade é especialmente importante para sistemas de energia híbridos, já que pode influenciar a capacidade e o regime de operação. Deste modo, é importante conhecer a disponibilidade de recursos quanto à sua amplitude (valores mínimo e máximo), valor médio e comportamento ao longo do tempo (BELUCO *et al.*, 2008).

A Figura 11 apresenta duas curvas senoidais, mostrando uma instância complementar que é considerada perfeita para expressar o conceito de complementaridade. As curvas apresentam disponibilidades hipotéticas de duas fontes de energia, expressas em termos de energia ou potência ao longo de um ano. As amplitudes das variações de disponibilidades de energia são iguais, a disponibilidade mínima de uma fonte coincide com a disponibilidade máxima da outra, apresentando assim valores médios iguais (mesmo potencial de geração de energia), e a variação entre máxima ou mínima disponibilidade de parâmetros base para geração de energia acontece no mesmo período de defasagem no tempo.



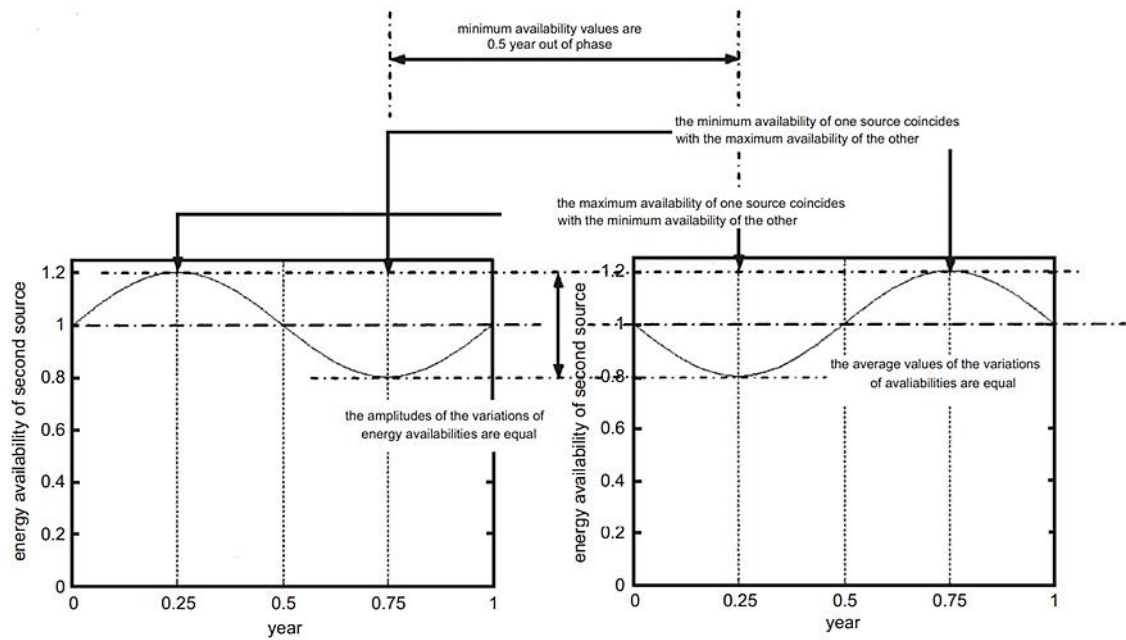


Figura 11. Funções matemáticas que caracterizam as disponibilidades de energia perfeitamente complementares ao longo de um ano.  
(Fonte: Beluco *et al.*, 2008).

A complementaridade entre as fontes de energia solar e eólica pode ser quantificada por meio de índices adequados, variando de 0 a 1, onde a complementaridade máxima é igual a 1, se igual a 0 não apresenta complementaridade, e valores intermediários estão linearmente relacionados. Os três índices – tempo, energia e amplitude – são definidos para avaliar a complementaridade dos recursos e definições são descritos na metodologia deste trabalho.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo para prospectar áreas que apresentem potencial para instalação de sistemas híbridos eólicos-solares contempla a análise pontual através do manejo de dados meteorológicos para obter as componentes tempo, energia e amplitude, e quantificar as complementaridades entre os dois recursos energéticos. Os resultados serão apresentados através de mapas, no sistema de referência de Projeção Policônica do Brasil, SIRGAS 2000.

Os dados meteorológicos do estudo foram gerados no formato CSV, e todas as equações apresentadas nos tópicos a seguir foram calculadas através do software Microsoft Excel (versão 2012). Os valores de irradiação solar em MJ/m<sup>2</sup> foram convertidos para W/m<sup>2</sup> para que fosse possível comparar as disponibilidades de energia eólica e solar. Todas as equações de complementaridade foram definidas conforme Beluco *et al.* (2008), que serão descritas posteriormente.

A análise espacial foi feita por meio do software SAGA GIS 2.3.2, usando o interpolador *Thin plate spline (TPS)*, técnica baseada em *splines* para interpolação e suavização de dados, com regularização de 0,05, raio de busca de 1000 m e tamanho do pixel de 500 m, usando o número máximo de pontos mais próximos em todas as direções. Esse foi escolhido por apresentar um melhor resultado na análise de erros residuais com os demais interpoladores.

Todas as outras operações para apresentar os resultados foram realizadas no software QGIS 3.10.

### 4.1 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos utilizados são do “National Centers for Environmental Prediction (NCEP) - Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), 2017”. O CFSR é um produto de reanálise de terceira geração, global de alta resolução acoplando atmosfera-oceano-superfície-gelo do mar. A resolução horizontal da grade da atmosfera global CFSR é de aproximadamente 38 km (0,312°) e o passo temporal é de 6 h.

Para a análise foi utilizada uma série temporal de 2004 a 2014, com dados de velocidade (m/s) a 10 m de altura e irradiação solar (MJ/m<sup>2</sup>) incidente à superfície. Com os dados diários foram calculados os valores médios mensais da série histórica para estimar os valores médios, máximos e mínimos anuais.

#### 4.1.1 Área de estudo

A área de estudo (Figura 12) abrange toda a borda litorânea da região nordeste do Brasil, num domínio de aproximadamente 200 a 300 km onshore e 100 km offshore. Nesta área foram espacializados 602 pontos com os dados meteorológicos.

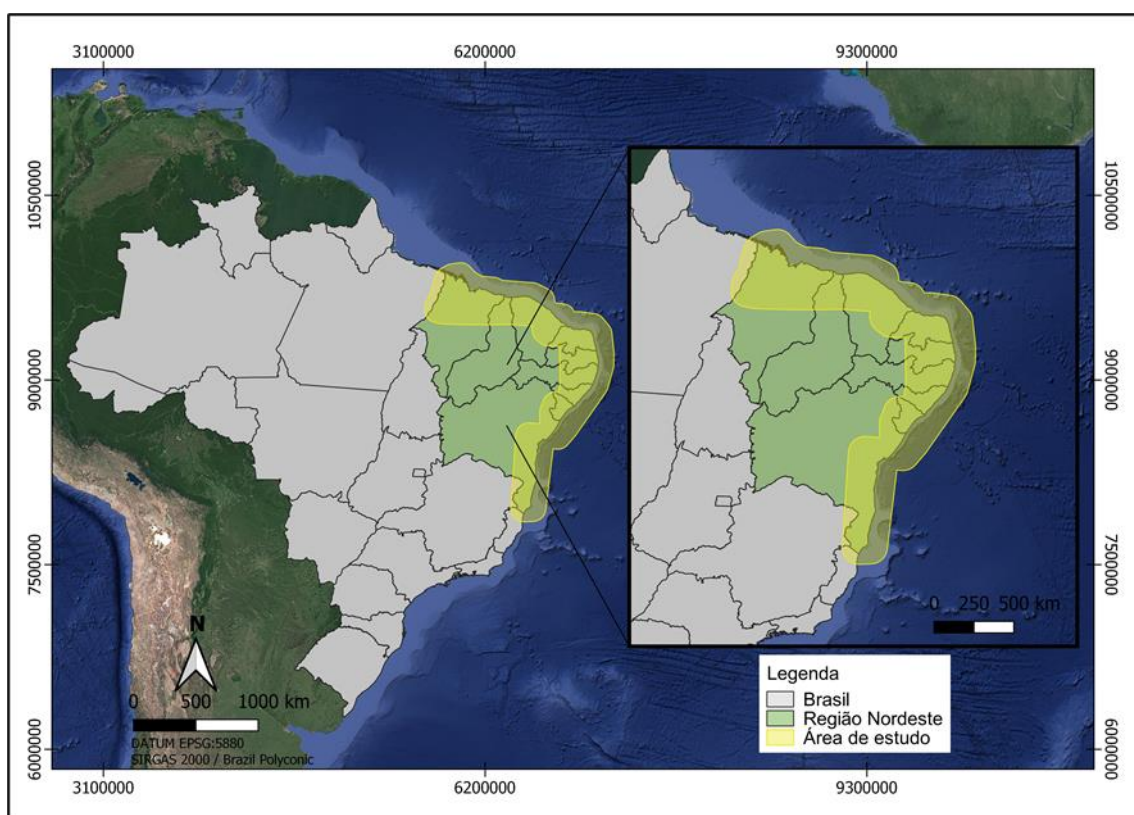


Figura 12. Mapa de localização da área de estudo.

A Região Nordeste brasileira apresenta alto potencial de utilização de energia solar e de eólica para geração elétrica. Essa região apresenta vantagens em relação às demais regiões brasileiras, graças à maior intensidade da irradiação, além da presença de “jazidas” de vento com as melhores condições de aproveitamento energético (BEZERRA *et al.*, 2015; CEPEL, 2013). Além disso, historicamente, com a crescente demanda de energia elétrica no Nordeste, faz-se necessária a importação de energia de outras regiões,

principalmente do Subsistema Norte. Tal fato também foi utilizado como critério para a escolha dessa área.

## 4.2 COMPLEMENTARIDADE TEMPORAL

A complementaridade temporal ocorrerá quando as disponibilidades apresentam períodos que se complementam ao longo do tempo em uma mesma região e só será completa quando a disponibilidade mínima ocorrer em um período de defasagem que seja metade do período observado ao longo do ano (180 dias ou 6 meses).

O índice de complementaridade parcial no tempo ( $K_t$ ) é definido conforme a Equação (1) para esse estudo, no qual o denominador representa o intervalo mínimo necessário para complementaridade. O índice  $K_t$  avalia o intervalo de tempo entre os valores mínimos de disponibilidade das duas fontes de energia. Se o intervalo for exatamente a metade do período, o índice será igual a 1 e apresentará uma complementaridade máxima. Se o intervalo for nulo, isto é, se os mínimos de disponibilidade coincidem, o índice será igual a zero, ou seja, não apresentará complementaridade. Os valores intermediários estão linearmente relacionados.

$$K_t = \frac{|dw - ds|}{\sqrt{|Dw - dw| \cdot |Ds - ds|}} \quad (1)$$

Onde  $K_t$  (adimensional) é o índice de complementaridade parcial no tempo,  $dw$  é o mês de menor disponibilidade eólica,  $ds$  o mês de menor disponibilidade solar,  $Dw$  o mês de maior disponibilidade eólica e  $Ds$  o mês de maior disponibilidade solar.

## 4.3 COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA

A complementaridade energética ocorrerá quando as disponibilidades médias anuais dos recursos energéticos comparados forem iguais e só será possível quantificá-la se a complementaridade no tempo existir.

O índice de complementaridade energética parcial ( $K_e$ ), é definido pela Equação (2) e avalia a relação entre os valores médios das funções de disponibilidade. Se os valores

médios são iguais, o índice deve ser igual a 1. Se esses valores forem diferentes, o índice deve ser menor e tender a zero conforme as diferenças aumentam. Valores intermediários de diferença são linearmente relacionados ao índice.

$$Ke = 1 - \sqrt{\left(\frac{E_w - E_s}{E_w + E_s}\right)^2} \quad (2)$$

Onde Ke (adimensional) é o índice de complementaridade energética parcial,  $E_w$  (W/m<sup>2</sup>) é a disponibilidade média anual de Energia Eólica e  $E_s$  (W/m<sup>2</sup>) é a disponibilidade de Energia Solar para o mesmo período.

#### 4.3.1 Disponibilidade de Energia Eólica

A base de dados utilizada apresenta valores para uma altura à 10 m da superfície, e para torná-los mais próximos dos disponíveis à altura dos aerogeradores, em torno de 100 m, realizou-se a modelagem logarítmica apresentada na Equação (3), conforme Custódio (2013).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\ln(h_1/Z_0)}{\ln(h_2/Z_0)} \quad (3)$$

Onde  $V_1$  (m/s) é a velocidade do vento no ponto 1,  $h_1$  (m) é a altura do vento no ponto 1,  $V_2$  (m/s) é a velocidade do vento no ponto 2,  $h_2$  (m) é a altura do vento no ponto 2, e  $Z_0$  (m) é o comprimento de rugosidade no local.

A rugosidade da superfície representa os efeitos do terreno à montante, sendo utilizados os valores definidos por Troen e Pettersen (1989) de  $Z_0 = 0,0002$  m nos pontos offshore (água, mares e lagos) e  $Z_0 = 0,4$  m nos pontos onshore (áreas urbanas, florestas e terras de fazenda com muitos quebra-ventos).

Para transformar a velocidade do vento em potência média por áreas de disco drenadas pelas pás da turbina eólica,  $P_w/A$  (W/m<sup>2</sup>), utilizou-se a Equação (4).

$$\frac{P_w}{A} = \frac{1}{2} C_p \eta_c \rho_{ar} k V^3 \quad (4)$$

Onde  $P_w/A$  ( $W/m^2$ ) é potência média por áreas de disco drenadas pelas pás da turbina eólica,  $C_P$  (adimensional) é o coeficiente de energia para uma turbina eólica,  $\eta_C$  (adimensional) é a eficiência de conversão mecânica,  $\rho_{ar}$  ( $kg/m^3$ ) é a densidade do ar em condições atmosféricas padrão,  $k$  (adimensional) é o parâmetro de forma e  $V$  (m/s) é a velocidade média do vento na altura  $h$ .

Os valores hipotéticos adotados para  $C_P$  e  $\eta_C$  foram iguais a 100%, esta simplificação foi feita para tornar o resultado independente da qualidade ou tipo da turbina eólica. O valor de  $\rho_{ar}$  é igual a  $1,225 kg/m^3$ . O parâmetro  $k$  de forma de *Weibull* será deduzido a seguir.

#### 4.3.1.1 Parâmetros de Weibull

A função densidade de probabilidade de Weibull representa a distribuição do vento no local segundo as Equação (5). O método utilizado para determinar os parâmetros de Weibull foi através do desvio padrão da velocidade média e a função *Gamma* conforme Equação (6) e (7).

$$f(v) = \frac{k}{C} \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^k} \quad (5)$$

Sendo que,

$$C = \frac{V}{\text{Gamma} \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (6)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{V}\right)^{-1.086} \quad (7)$$

Onde  $f(v)$  é a função densidade de probabilidade de Weibull,  $V$  (m/s) é a velocidade do vento (m/s),  $C$  (m/s) é o fator de escala,  $k$  (adimensional) é o fator de forma e  $\sigma$  (m/s) é o desvio padrão da velocidade do vento.

A mudança do comportamento do vento com a altura resulta em alterações das constantes de forma e escala da função de *Weibull* determinados pelas Equações (8) a (10).

$$C_2 = C_1 \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^n \quad (8)$$

Sendo que,

$$n = \frac{0,37 - 0,008 \ln(C_1)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)} \quad (9)$$

$$k_2 = k_1 \left( \frac{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_1}{10}\right)}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{h_2}{10}\right)} \right) \quad (10)$$

Onde  $C_2$  (m/s) é o fator de escala com a altura  $h_2$ ,  $C_1$  (m/s) é o fator de escala com a altura  $h_1$ ,  $h_1$  é a altura de referência (m),  $h_2$  é a altura onde se deseja determinar os parâmetros de Weibull (m),  $n$  (adimensional) é o expoente da equação 9,  $k_2$  (adimensional) é o fator de forma na altura  $h_2$  e  $k_1$  (adimensional) é o fator de forma na altura  $h_1$ .

As distribuições de velocidades do vento e da função Weibull para 10 m e 100 m estão representadas na Figura 13. Os valores de forma calculados  $k = 2.15$  para 10 m e  $k = 2.51$  para 100 m foram ajustados, respectivamente, para os valores de  $k = 2.0$  e  $k = 2.5$ .

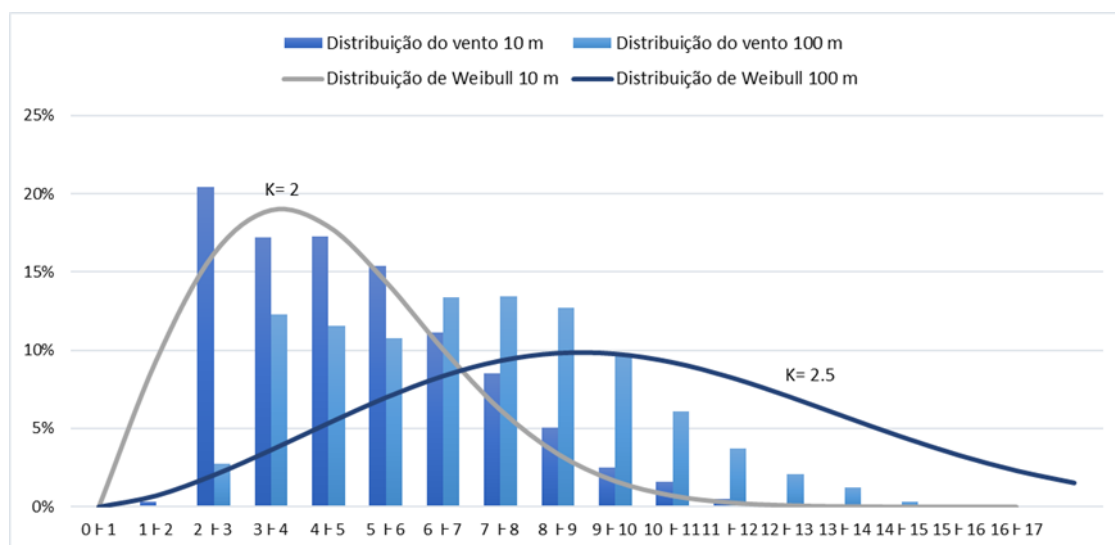


Figura 13. Representação gráfica das distribuições de velocidades do vento e da função Weibull.

### 4.3.2 Disponibilidade de Energia Solar

Os dados de radiação solar podem estar disponíveis em várias formas diferentes e serem usados para uma multiplicidade de propósitos na concepção e desenvolvimento de sistemas de energia solar. Contudo, o desempenho do processo geralmente não é linear com a irradiação solar, e por isso as superfícies inclinadas são essenciais para entradas mais precisas nos sistemas solares fotovoltaicos ou coletores (JAKHRANI *et al.*, 2012). O método utilizado para estimar a disponibilidade de energia solar (irradiação solar incidente mensal anual em uma superfície inclinada) para o céu isotrópico descrito por Duffie & Beckman (2013) foi simplificado neste trabalho, desconsiderando a irradiação difusa devido a variedade de fatores envolvidos. Assim, a irradiação solar total, Equação 11, sobre a superfície inclinada, consiste na soma entre a irradiação direta (irradiância solar recebida por uma superfície horizontal adaptada para um ângulo de incidência numa determinada superfície inclinada), Equação 12, e a irradiação refletida pelo solo (fração da energia refletida pelo solo que atinge a superfície inclinada), Equação 13.

$$R_t = R_d + R_s \quad (11)$$

Sendo que,

$$R_d = R_h \cdot \cos(\beta) \quad (12)$$

$$R_s = R_h \cdot \rho \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos(\beta)) \quad (13)$$

Onde  $R_t$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) é a irradiação total sobre a superfície inclinada,  $R_d$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) é a irradiação direta sobre a superfície inclinada,  $R_s$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) é a irradiação refletida pela superfície horizontal sobre a superfície inclina,  $R_h$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) é a irradiação solar sobre a superfície horizontal,  $\beta$  é o ângulo de inclinação da superfície e  $\rho$  é o albedo da superfície horizontal.

O ângulo de inclinação da superfície para região estudada foi de  $\beta = -12$  e o albedo para áreas onshore  $\rho = 0,16$  e áreas offshore  $\rho = 0,02$ , conforme REES (2012), Figura 14. O valor do albedo não é linear e pode sofrer influência pela latitude e sazonalidade, além



disso o albedo da superfície inclinada também pode afetar a geração de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos solares, pois apresentam uma resposta espectral baseada, por exemplo, nos materiais de silício hidrogenado amorfo (a-Si:H) e silício cristalino (C-Si).

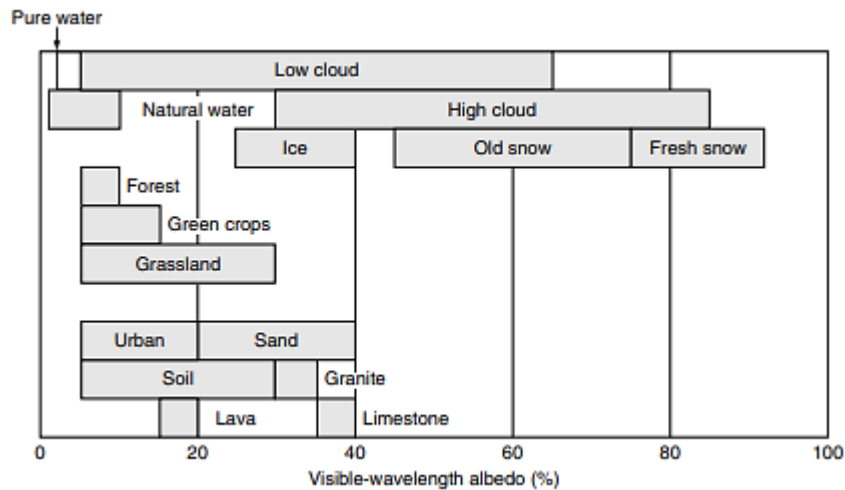


Figura 14. Valores típicos de albedo integrados sobre a faixa de onda visível para normalmente. (Fonte: REES, 2012).

#### 4.4 COMPLEMENTARIDADE DE AMPLITUDE

A complementaridade da amplitude compara as amplitudes de variação de cada recurso energético e ocorrerá quando as diferenças entre a disponibilidade energética máxima e mínima, para as energias comparadas, forem iguais. Será obtido o máximo índice de complementaridade de amplitude parcial ( $K_a$ ), de valor igual a 1, quando os recursos energéticos apresentarem a mesma variação, tendendo a zero conforme as diferenças aumentam. Esse índice é obtido a partir da Equação 14 e Equação 15.

$$K_a = \begin{cases} \left[ \frac{1 - (\delta w - \delta s)^2}{(1 - \delta s)^2} \right], & \delta w \leq \delta s \\ \left[ \frac{(1 - \delta s)^2}{(1 - \delta s)^2 + (\delta w - \delta s)^2} \right], & \delta w > \delta s \end{cases} \quad (14)$$

Sendo que,

$$\delta = 1 + \frac{E_{m\acute{a}x} - E_{m\acute{i}n}}{E_c} \quad (15)$$

Onde  $K_a$  (adimensional) é o índice de complementaridade de amplitude parcial,  $\delta$  (adimensional) é a variação de amplitude energética, sendo  $\delta w$  a variação de energia eólica e  $\delta s$  a variação de energia solar,  $E_{m\acute{a}x}$  ( $W/m^2$ ) é o máximo valor de energia disponível da fonte,  $E_{m\acute{i}n}$  ( $W/m^2$ ) é o mínimo valor de energia disponível da fonte e  $E_c$  ( $W/m^2$ ) é o consumo médio de energia.

O consumo médio de energia foi obtido através de dados da EPE (Empresa de Pesquisa Energética), empresa pública vinculada ao Ministério de Minas e Energia. O valor é referente a região nordeste do Brasil para o ano de 2020. Como esse valor não se refere exclusivamente ao da área de estudo, o mesmo está superestimado.

#### 4.5 COMPLEMENTARIDADE TOTAL

A complementaridade total busca integrar as três componentes de complementaridade, tempo, energia e amplitude, ao índice de complementaridade total (KT), conforme a Equação (16). Através desse índice será possível estimar a complementaridade máxima nas três componentes e apresentar os lugares apropriados para a implantação dos sistemas híbridos eólico-solar.

$$KT = K_t \cdot K_e \cdot K_a \quad (16)$$

Onde  $KT$  (adimensional) é o índice de complementaridade total,  $K_t$  (adimensional) é o índice de complementaridade temporal parcial,  $K_e$  (adimensional) é o índice de complementaridade energética parcial e  $K_a$  (adimensional) é o índice de complementaridade de amplitude parcial.

## 4.6 SISTEMA ENERGÉTICO

Após a prospecção dos sistemas híbridos eólicos-solar, será verificado através dos dados disponíveis no *website* WEBMAP interativo do sistema energético brasileiro da EPE (2021), os locais com projetos eólicos e fotovoltaicos (sistemas híbridos ainda não se encontram mapeados), bem como o traçado de linhas de transmissão existentes e planejados. Com essa análise será possível identificar se os locais prospectados já estão sendo utilizados, a fim de uma possível inserção e/ou expansão de sistemas híbridos eólicos-solar no SIN.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os sistemas híbridos de grande porte, as alturas dos aerogeradores, atualmente, são maiores ou iguais a 100 m. Porém, nesse estudo, também decidiu-se apresentar os resultados para uma altura de aerogeradores de 10 m, de modo a comparar o comportamento dos índices de complementaridade com essa variável. Além disso, as alturas menores também possibilitarão identificar lugares para instalação de sistemas descentralizados de pequeno porte, como para uso residencial e industrial.

### 5.1 COMPLEMENTARIDADE TEMPORAL

A complementaridade temporal independe da altura de medição do vento, visto que são identificados na série histórica os meses ao longo dos anos que apresentam maiores/menores irradiação solar e velocidade do vento. Na Figura 15 é possível observar que após o manejo desses dados, as curvas logarítmicas das velocidades máximas e mínimas para as diferentes alturas possuem o mesmo crescimento, por tanto apresentarão os mesmos meses de máximas e mínimas.

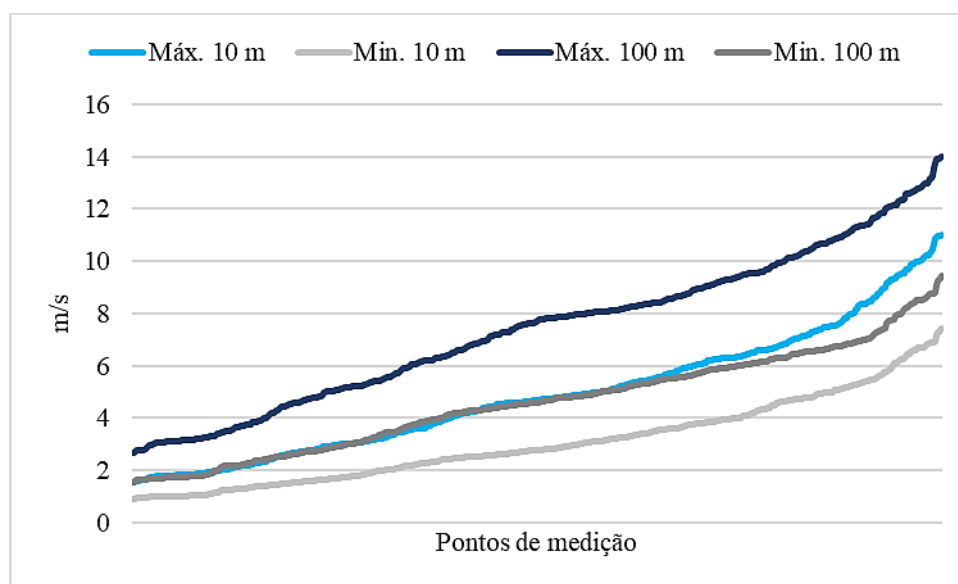


Figura 15. Curvas logarítmicas das velocidades máximas e mínimas do vento para diferentes alturas.

O estudo da complementaridade temporal máxima visa estimar os locais com as melhores condições básicas para a prospecção energética, enquanto que a complementaridade temporal mínima pode ser usada para estimar locais de expansão em momentos de aumento da demanda energética.

A Figura 16.A) mostra a complementaridade temporal mínima de irradiância solar e velocidade do vento, e a Figura 16.B), a complementaridade temporal máxima de irradiância solar e velocidades dos ventos. Os lugares com  $K_t > 0,8$  são aqueles onde os meses máximos/mínimos de cada uma das fontes renováveis tem uma defasagem próxima a 6 meses, apresentando assim uma maior complementaridade ao longo de 1 ano. Outrora, nos lugares com  $K_t < 0,2$ , os meses de máxima/mínima são muito próximos, ou seja, se complementam em um período menor do tempo.

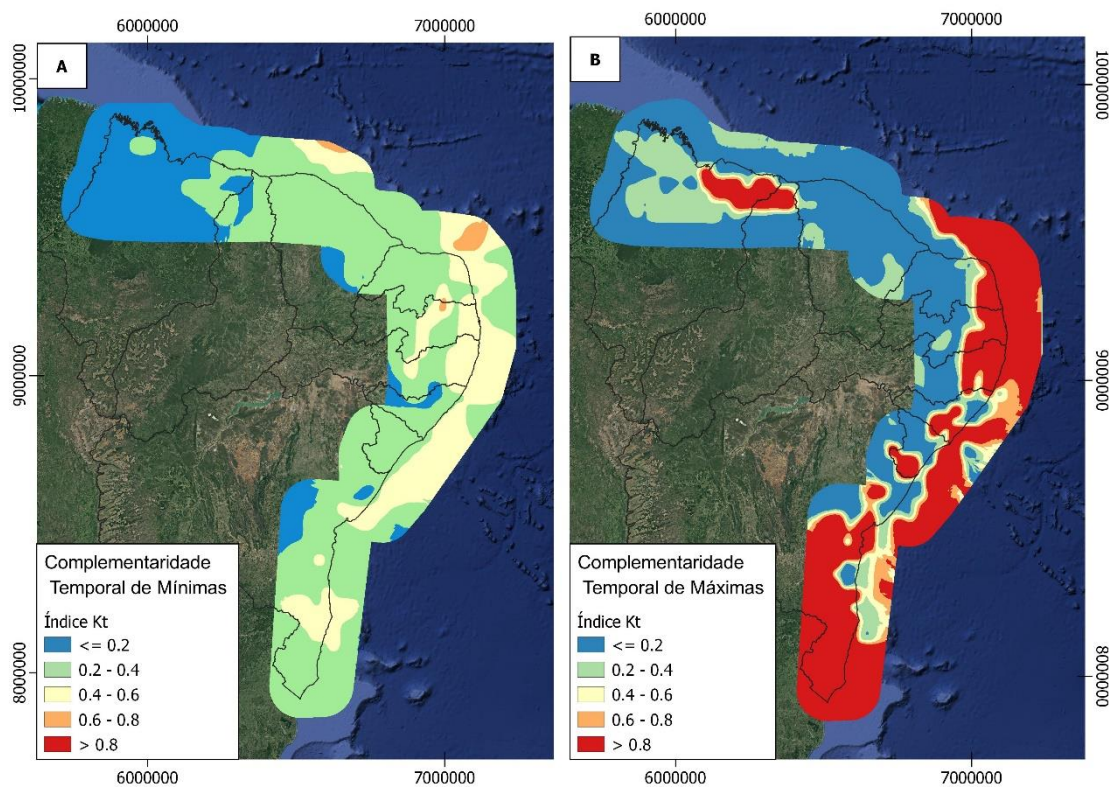


Figura 16. A) Complementaridade Temporal Mínima. B) Complementaridade Temporal Máxima.

A complementaridade temporal máxima  $K_t > 0.8$  visando aos mínimos valores dos parâmetros analisados não foi identificada na área de estudo, apenas complementaridade com valores intermediários, sendo entre  $0.2 > K_t < 0.4$  em grande parte dela. Os melhores lugares com complementaridade temporal máxima  $K_t > 0.8$  visando aos máximos valores

dos parâmetros analisados estão em todo o litoral leste da região nordeste, incluindo todo o sul da área estudada no estado da Bahia, norte do Piauí e nordeste do Maranhão.

Através desses resultados apresentados é possível observar uma tendência senoidal entre os mapas de complementaridade temporal mínima e complementaridade temporal máxima, ou seja, regiões com índices de complementaridade inversamente proporcionais.

## 5.2 COMPLEMENTARIDADE ENERGÉTICA

A complementaridade energética expressa os locais entre as duas fontes renováveis onde há o mesmo potencial médio de geração de energia considerando a complementaridade temporal. Na Figura 17.A) a complementaridade energética com vento a 10 m de altura apresenta um índice máximo  $K_e > 0,8$  em toda costa da região nordeste e porção dos estados Rio Grande do Norte e Paraíba. Equanto na Figura 17.B) a complementaridade energética com vento a 100 m de altura apresenta um índice máximo  $K_e > 0,8$  em toda costa do Nordeste estendendo-se para a parte onshore dos estados Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia. Os índices mínimos de complementaridade energética  $K_e < 0,4$  para as duas comparações estão localizados na parte onshore do estado do Maranhão e sul da Bahia.

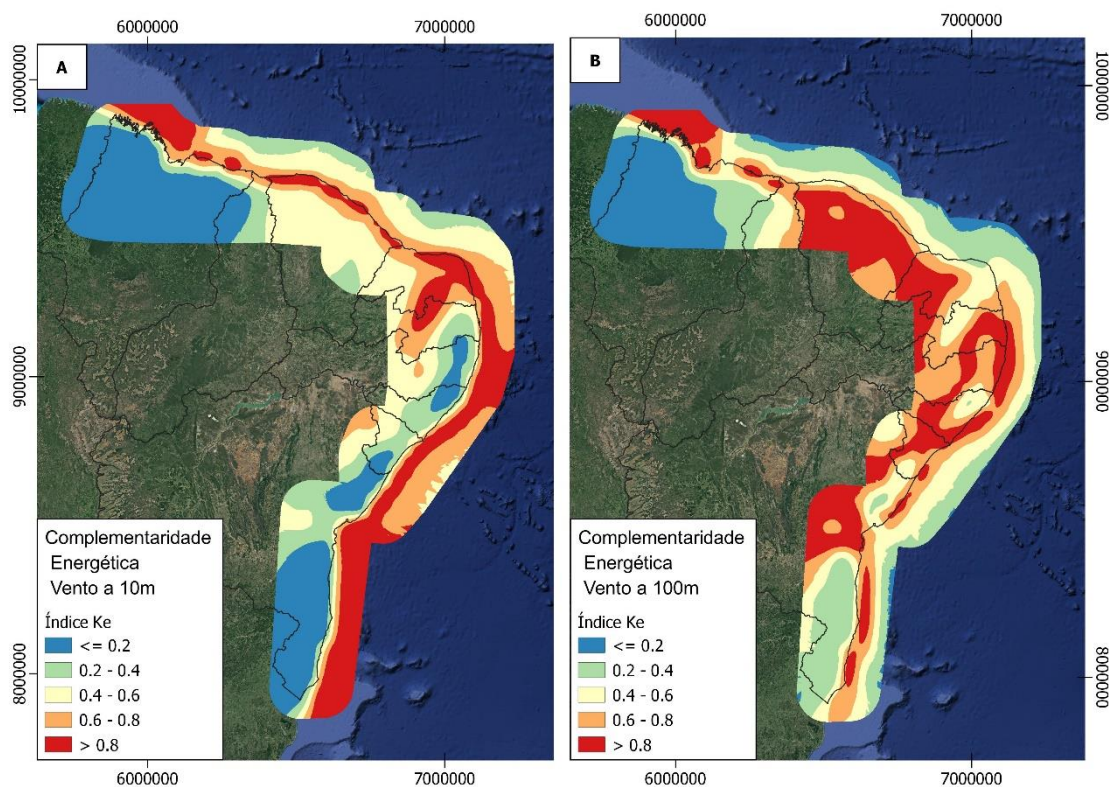


Figura 17.A) Complementaridade Energética com vento a 10 m de altura. B) Complementaridade Energética com vento a 100 m de altura.

Aproximadamente 40% da área analisada considerando velocidades a 100 m de altura apresenta complementaridade energética próxima da ideal, ou seja, potencial para geração de grande porte, sendo 5% offshore e 35% onshore.

As diferenças entre os índices de complementaridade energética de acordo com a altura do vento pode ser explicada devido ao fato de que em offshore a rugosidade da água é baixa, logo, em menores alturas, os dois parâmetros demonstram um desempenho melhor que na parte onshore. Com o aumento da altura do vento e consequente velocidade, podemos ver que esses parâmetros superam a rugosidade do terreno e demais obstáculos, tornando os lugares de melhor complementaridade energética situados não só offshore mas também onshore.

### 5.3 COMPLEMENTARIDADE DE AMPLITUDE

A complementaridade de amplitude para ambas as alturas de velocidade encontra-se visivelmente em lugares opostos aos da complementaridade energética, como mostra



a Figura 18.A) e Figura 18.B), visto que o índice de complementaridade máxima  $K_a > 0,8$  busca os lugares onde as variações de amplitude energética são iguais. Esse estudo é importante para buscar lugares onde a carga energética enviada à rede não possui tantas oscilações mensais ao longo do tempo, sendo mais acessível de projetar e inserir ao sistema elétrico existente.

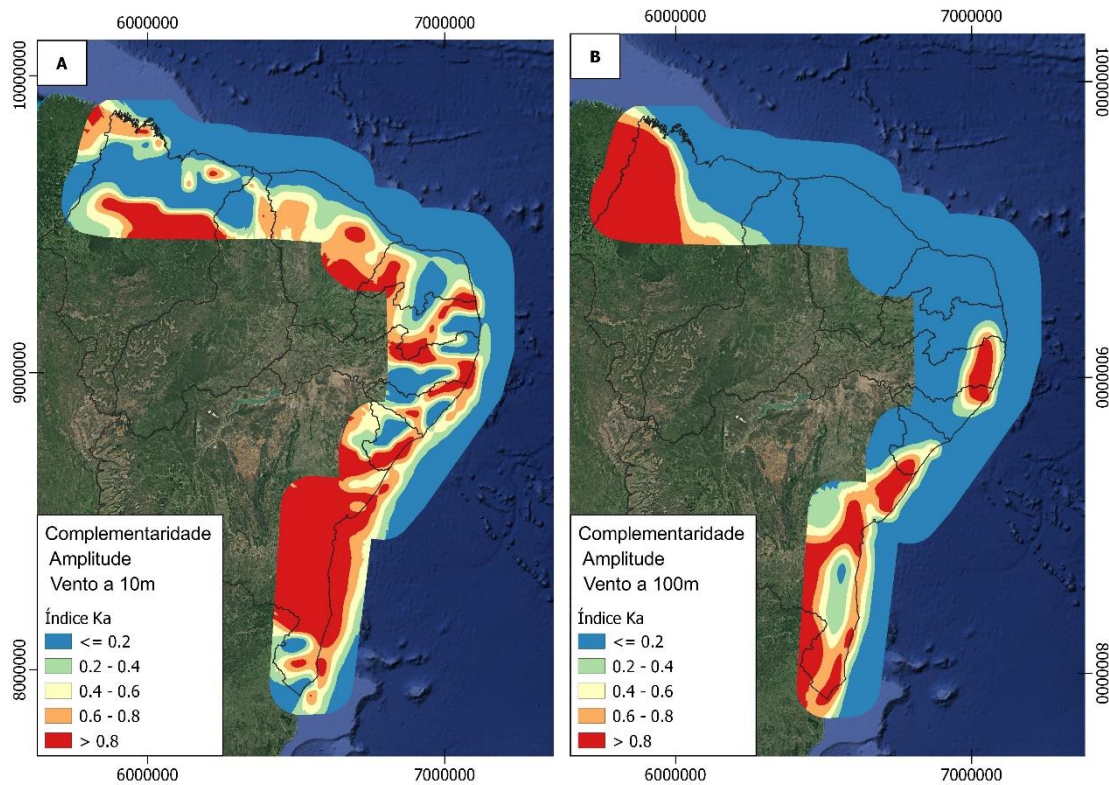


Figura 18.A) Complementaridade de Amplitude com vento a 10 m de altura. B) Complementaridade de Amplitude com vento a 100 m de altura.

É possível reparar que os maiores índices de complementaridade estão na parte onshore da região estudada. Esse acontecimento pode estar relacionado ao fato de que em offshore há maior abrangência de fenômenos meteorológicos, como correntes marítimas e de ventos, os quais fazem com que a magnitude de oscilação entre máxima e mínima de uma fonte seja muito diferente, logo apresente índice de complementaridade menor. Enquanto, na parte onshore ocorrem fenômenos de continentalidade, como presença de edificações e vegetação que podem, por exemplo, amenizar as oscilações de velocidade do vento. De tal modo, também é possível explicar o porquê das diferenças entre as regiões complementares apresentadas no mapa de acordo com a altura de medição do



vento, pois em alturas menores os fenômenos de continentalidade são mais presentes que em alturas maiores.

#### 5.4 COMPLEMENTARIDADE TOTAL

Quando as três componentes – tempo, energia e amplitude – são relacionadas, obtemos a complementaridade total, e é possível constatar onde há potencial híbrido eólico-solar de acordo com o melhor índice de complementaridade  $KT > 0,8$ , conforme Figura 19 e Figura 20. Esse resultado mostra as zonas onde há os máximos valores de geração de energia, com poucas oscilações nas amplitudes das fontes, e uma máxima temporal.

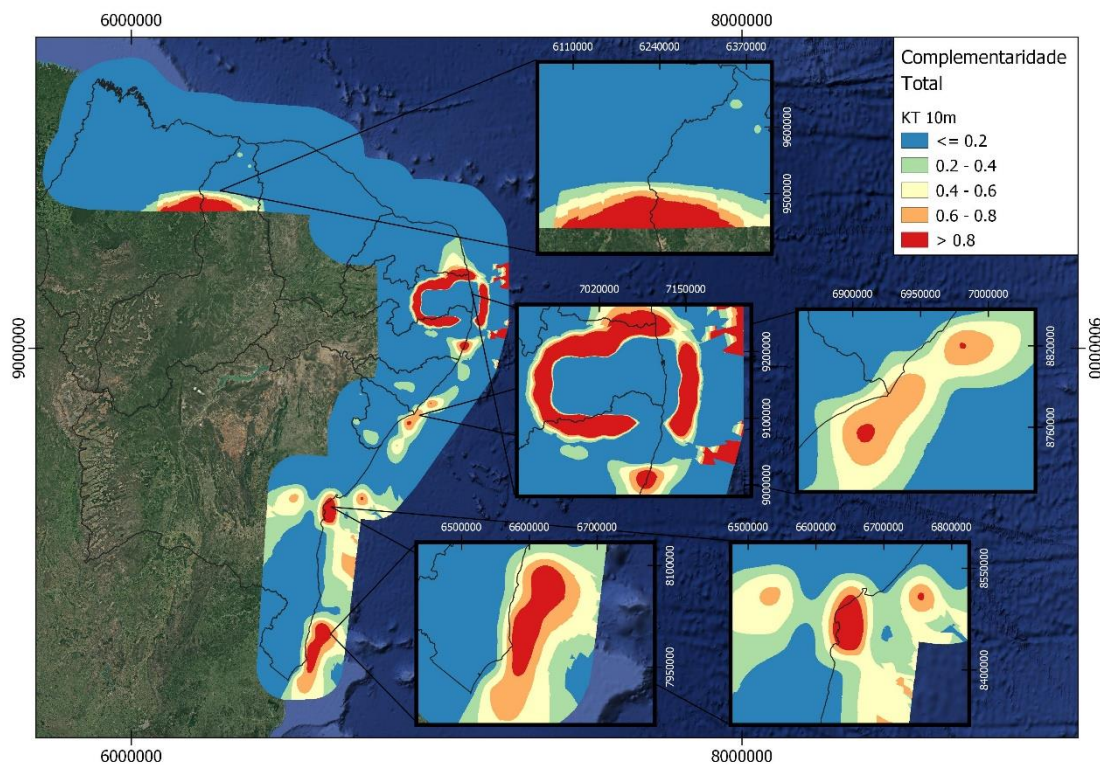


Figura 19. Complementaridade Total com vento a 10 m de altura.

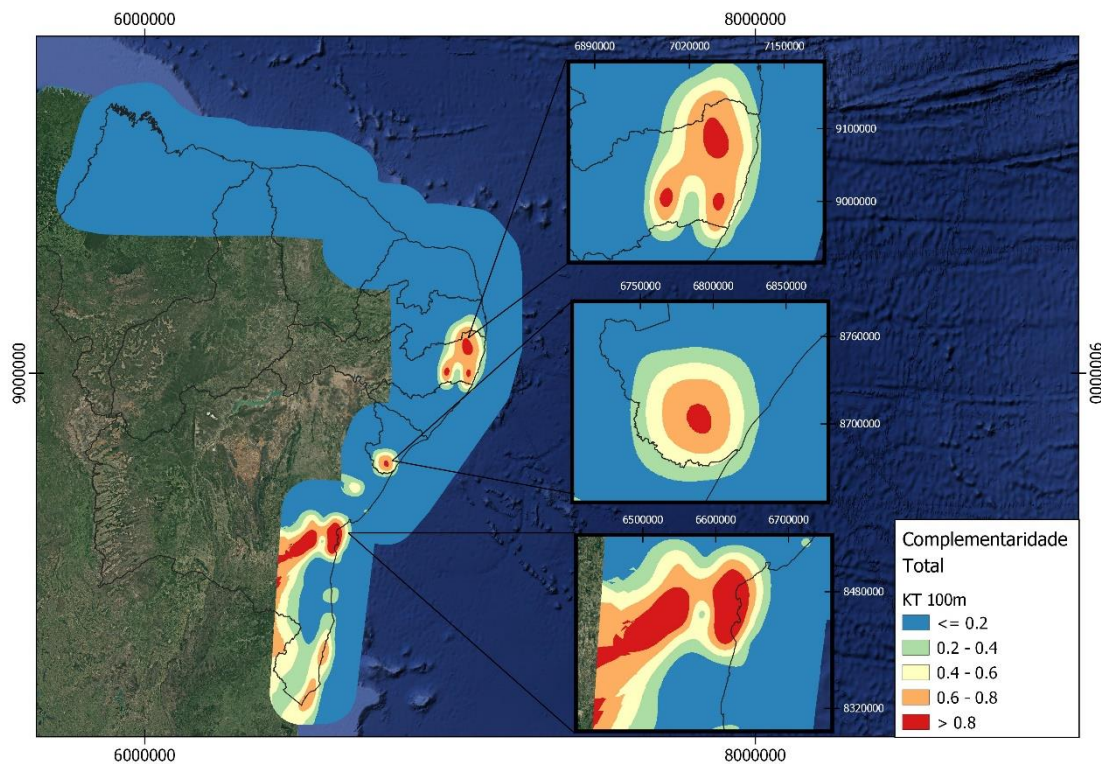


Figura 20. Complementaridade Total com vento a 100 m de altura.

Deste modo, são identificados 7 regiões com potencial híbrido eólico-solar, para pequeno porte (vento a 10 m de altura), na parte onshore do Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, e offshore distribuídos de nordeste á sudeste da costa. Como também, 3 regiões com potencial híbrido, para grande porte (vento a 100 m de altura) na parte onshore do Pernambuco, Sergipe e Bahia.

## 5.5 SISTEMA ENERGÉTICO

Após essa análise e verificando a base de dados existente e de expansão planejada do SIN, observa-se na Figura 21 que nos locais de grande porte prospectados, apenas

Pernambuco apresenta até o momento projetos eólicos e solares. Conjuntamente, todas as áreas apresentam proximidade a linhas de transmissão.

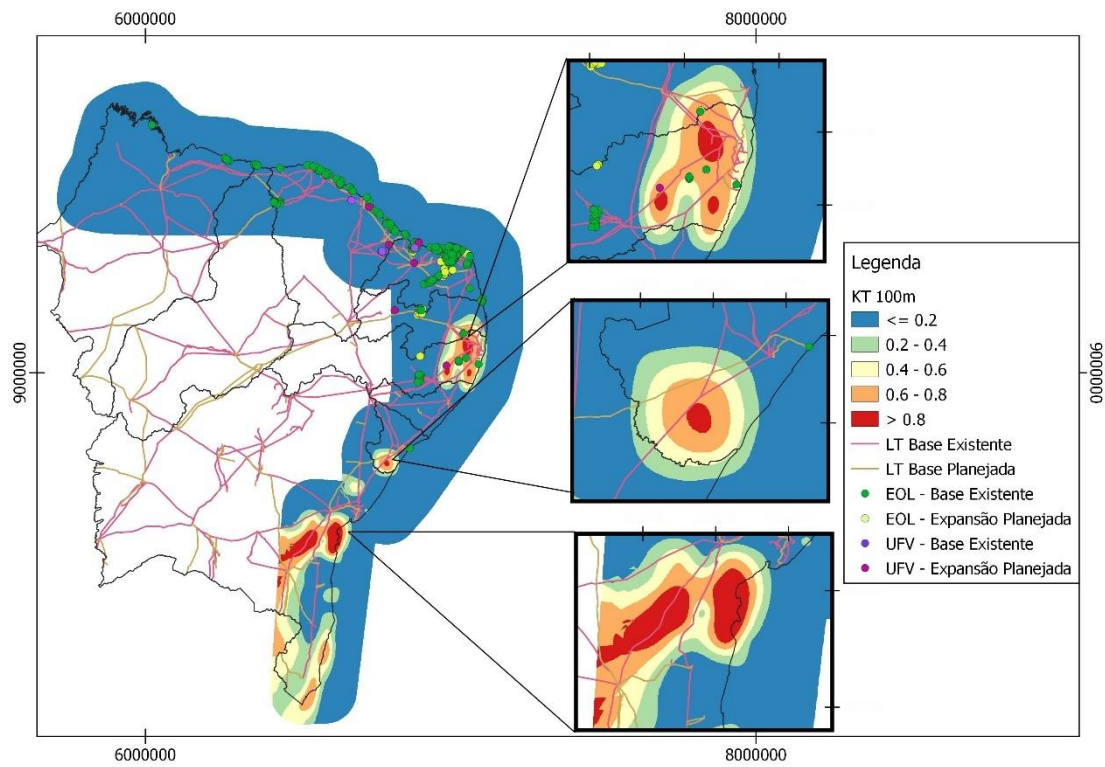


Figura 21. Complementaridade Total e Sistema interligado Nacional.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O método demonstrou que com critérios e dados básicos é possível obter uma ferramenta técnica para a prospecção de locais para implantação de sistemas híbridos eólico-solar. A área de estudo, em grande parte, possui um alto índice de complementaridade para as componentes tempo, energia e amplitude. Além disso, percebe-se que em alguns dos locais identificados ainda não há a exploração desses recursos renováveis e que os mesmos encontram-se próximos à malha elétrica existente, favorecendo sua possível instalação caso haja margem de escoamento.

O estudo de complementaridades é uma importante ferramenta para o planejamento e gestão dos profissionais de energia. Brevemente será possível avaliar se existe a viabilidade de operação entre duas ou mais fontes, ajudando na tomada de decisão e priorização de projetos, já que é disponibilizada uma comparação técnica quantitativa entre locais de interesse e/ou novas prospecções. Também pode ser usado como recurso para fundamentação de novas linhas de transmissão e ampliação do sistema elétrico.

Recomenda-se um estudo mais aprofundado da complementaridade energética considerando o desempenho dos equipamentos de geração de energia, o qual aumentará a acuidade dos resultados. Bem como a inserção de variáveis espaciais de melhor resolução, classificação do uso do solo (para estimar albedo e rugosidade específicas), relevo do terreno, dados de medições de estações anemométricas locais.

A abordagem da complementaridade espacial poderá ser utilizada para identificar um aumento na eficiência de um sistema interligado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARUL P.G., RAMACHANDARAMURTHY V. K., RAJKUMAR R.K. **Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 42, p. 597-608, 2015, ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.062>>

ATLANTIC. **Saiba como é construída a base do aerogerador**. Atlantic Energias Renováveis, Paraná, 2019. Disponível em: <<http://atlanticenergias.com.br/noticias/>>

BARBOSA, Gabriela Gonçalves. **Recursos Naturais Renováveis e Produção de Energia**. Revista Política Hoje, [S.l.], v. 23, n. 1, p. 193-215, fev. 2015. ISSN 0104-7094.

BELUCO, A., SOUZA, P. K. DE, KRENZINGER, A. **A dimensionless index evaluating the time complementarity between solar and hydraulic energies**. Renewable Energy, v. 33, Issue 10, 2008, p. 2157-2165, ISSN 0960-1481. Disponível em:<<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.019>>

BLAABJ F., MA K. **Wind Energy Systems**. Proceedings of the IEE, v. 105, n. 11, 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7927779>>

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília DF, 1981

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília DF, 2009

BRASIL. **Lei n. 12.305 de 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a lei n.9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providencias. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília DF, 2010

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020 ano base 2019**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2020a

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2050**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2020b

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Solar Fotovoltaica Flutuante - Aspectos Tecnológicos e Ambientais relevantes ao planejamento.** Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2020c

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Roadmap Eólica Offshore Brasil.** Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, 2020d

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. WEBMAP interativo do sistema energético brasileiro. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2021. Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>>

CRESESB. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito.** Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: simulações 2013.** Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, p.50, 2017

CUSTÓDIO, R. dos S. **Energia eólica para produção de energia elétrica.** 2. ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2013

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes.** John Wiley & Sons, 4ªed, p.944, 2013, ISBN: 978-0-470-87366-3

FIGUEIREDO, M. B. S., MARTINS, T. M. **Comparativo entre usinas fotovoltaicas: usinas com sistema tracker ou com estruturas fixas.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica e Telemática, Universidade Do Sul de Santa Catarina, 2017

FOLEY, A. M., LEAHY, P. G., MARVUGLIA, A., & MCKEOGH, E. J. **Current methods and advances in forecasting of wind power generation.** Renewable Energy, v. 37(1), p. 1–8., 2012

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento.** Estudos Avançados, vol. 12, nº 33, São Paulo, p. 7-15, mai./ago. 1998

GONÇALVES, P. V. S., GONZÁLEZ, M. O. A. **Photovoltaic solar energy: Conceptual framework.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 74, p. 590-601, 2017, ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.081>>

GUO S., LIU Q., SUN J., JIN H. **A review on the utilization of hybrid renewable energy.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 91, p.1121-1147, 2018, ISSN 1364-0321. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.105>>

IRENA. **Renewable Energy Benefits: Leveraging Local Capacity For Offshore Wind**. International Renewable Energy Agency, 2018

IEA. **Offshore Energy Outlook 2018**. IEA, Paris, 2018. Disponível em:<<https://www.iea.org/reports/offshore-energy-outlook-2018>>

JAKHRANI, A.Q., OTHMAN, A.K., RIGIT, A.R., SAMO, S.R. AND KAMBOH, S.A. **Estimation of Incident Solar Radiation on Tilted Surface by Different Empirical Models**. International Journal of Scientific and Research Publications, v.2, p. 1-6, 2012, ISSN 2250-3153

JENKINS, N., & EKANAYAKE, J. **Renewable Energy Engineering**. Cambridge University Press, 2017, DOI: 10.1017 / 9781139236256

JOHNSON, G.L. **Wind Energy Systems**. European Wind Energy Association, 2009.

KRELL, A. J.; SOUZA, C. B. de C. **A sustentabilidade da matriz energética brasileira: o marco regulatório das energias renováveis e o princípio do desenvolvimento sustentável**. Revista de Direito Econômico e Socioambiental, Curitiba, v. 11, n. 2, p. 157-188, 2020. Disponível em: <[doi:10.7213/rev.dir.econ.soc.v11i2.26872](https://doi.org/10.7213/rev.dir.econ.soc.v11i2.26872)>

MARTINS, F. O. **Seguidor solar de dois eixos com motores passo-a-passo**. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Nova de Lisboa, 2016

NREL. **2019 Offshore Wind Technology Data Update**. National Renewable Energy Laboratory, 2017

NCEP. **The Climate Data Guide: Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)**. National Centers for Environmental Prediction, 2017. Disponível em <<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>>

ONS. **Sumário Executivo 2020, Plano de Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN**. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2020.

ORTIZ, E. R. T. **Sistemas Fotovoltaicos e eólicos: metodologia para análise de complementaridade espacial-temporal com aplicação no dimensionamento e análise de risco financeiro**. Tese (doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo, 2014.



PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R. ; COSTA, R. S. ; LIMA, F. J. L. DE ; RÜTHER, R. ; ABREU, S. L. DE ; TIEPOLO, G. M. ; PEREIRA, S. V. ; SOUZA, J. G.S DE. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed., São José dos Campos, INPE, 2017. Disponível em: <<http://doi.org/10.34024/978851700089>>

PINHO J. T.; BARBOSA C. F. O.; PEREIRA E. J. DA S.; SOUZA H. M. S.; BLASQUES L. C. M.; GALHARDO M. A. B.; MACÊDO W. N. **Sistemas Híbridos, Soluções Energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia, 1ª Edição, 396p, Brasília, 2008. ISBN 978-85-98341-02-6

SILVA, F. J. F. D. **Projeto mecânico de aerogerador de eixo vertical para instalação em ambiente nearshore**. Projeto de Graduação – UFRJ, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2020

SIMAS, M.; PACCA, S. **Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável**. Estudos Avançados, São Paulo, v. 27, n. 77, p. 99-116, 2013. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142013000100008>>

REES, G. **Physical principles of remote sensing**. Cambridge University Press, New York, 3rd ed., 2012, ISBN 978-1-107-00473-3

TOMALSQUIM, M. **Integração das Fontes Renováveis Intermitentes na América Latina (report)**. Caracas: CAF, 2017. Disponível em: <<http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1222>>

TROEN, I.; PETERSEN, E. L. **European Wind Atlas**. Roskilde. Dinamarca: Risø National Laboratory, 1989.

VARELLA, Marcelo Dias. **Direito Internacional Econômico ambiental**. Belo Horizonte: Del Rey, 2004

WANG, H., LEI, Z., ZHANG, X., ZHOU, B., PENG, J. **A review of deep learning for renewable energy forecasting**. Energy Conversion and Management, v.198, 2019, DOI 111799, ISSN 0196-8904. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111799>>